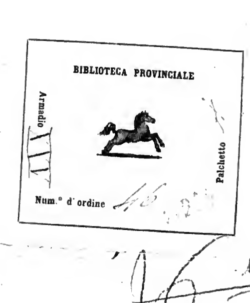



FONDO PIZZOFALCONE

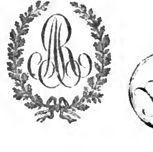

BIBLIOTECA PROVINCIALE
Armadio
Palchetto
Num.° d' ordine

COURS
DE PHYSIQUE.

COURS DE PHYSIQUE,

PAR E. PÉCLET,

PROFESSEUR DES SCIENCES PHYSIQUES AU COLLÉGE ROYAL DE MARSEILLE, CHARGÉ DANS CETTE VILLE DES COURS PUBLICS DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE APPLIQUÉES AUX ARTS, MEMBRE DE L'ACADÉMIE DE MARSEILLE, DE LA SOCIÉTÉ ROYALE DE MÉDECINE, ET DE PLUSIEURS AUTRES SOCIÉTÉS SAVANTES.





MARSEILLE,

CHEZ ANTOINE RICARD, IMPRIMEUR DU ROI ET DE LA PRÉFECTURE, RUE DE LA CANNEBIÈRE, N° 19.

M. DCCC. XXIII.

INTRODUCTION.

Tous les faits qui, soumis à nos calculs et à nos observations, sont devenus le domaine de la science, peuvent se diviser en deux grandes séries.

Dans la première, tous sont des conséquences rigoureuses d'un petit nombre de faits primitifs, dont l'existence nécessaire est d'abord sentie par tous les esprits : tels sont ceux qui composent les sciences exactes, les mathématiques. Ainsi toutes les propriétés des nombres, des lignes, des surfaces et des corps dérivent d'un petit nombre d'axiomes, tels que :

« Le tout est plus grand que la partie. »

« La ligne droite est le plus court chemin d'un point à un autre. »

Dans la seconde série, au contraire, tous les faits particuliers sont des conséquences d'un certain nombre de faits primitifs dont l'existence ne nous paraît point nécessaire : tels sont tous ceux qui constituent les sciences d'observation.

En mathématique, les faits primitifs étant connus, le but qu'on se propose, est d'en déduire tous les autres par des conséquences rigoureuses.

Dans les sciences naturelles, au contraire, les faits du second ordre sont les premiers à s'offrir à nos recherches ; et le but qu'on se propose est de remonter aux faits primitifs autour desquels ils viennent se grouper.

Mais ces deux branches de nos études sont tellement liées entr'elles,

et les points de connexion si multipliés, que la connaissance de la première est souvent indispensable pour bien comprendre et déterminer les objets qui forment la seconde : nous aurons souvent occasion, dans le cours de cet ouvrage, de prouver cette vérité. Nous pouvons même ajouter, que les mathématiques, ne s'exerçant que sur des propriétés abstraites, ne sauraient être d'une utilité reconnue que par leur application aux sciences naturelles.

Le système des lois qui régissent la nature, la longue série de phénomènes qu'elle nous présente, les propriétés particulières des corps, leurs actions réciproques, leur classification, ne constituent réellement qu'une seule et même science. Destinée à suivre la nature dans toutes ses opérations, étendue et variée comme elle, on ne saurait l'embrasser d'un coup d'œil, et la vie de l'homme est trop courte pour suffire à cette immense investigation. Il a donc fallu en diviser l'étude, et de là sont nées les différentes branches de nos connaissances désignées sous les noms de *Physique*, de *Chimie* et d'*Histoire Naturelle.*

La Physique a pour objet l'étude des propriétés générales des corps que nous pouvons voir, toucher, peser, et que nous nommerons *Corps pondérables ;* et celle de plusieurs fluides qui paraissent dépourvus de pesanteur, et dont la matérialité n'est encore qu'une hypothèse probable : nous les désignerons sous le nom de *Fluides impondérables.*

La Chimie a pour objet l'étude des propriétés particulières des corps pondérables et de leurs actions réciproques.

Enfin, l'Histoire Naturelle classe d'une manière méthodique tous les corps répandus dans la nature ; elle les divise, 1° en corps inorganiques, dont l'étude constitue la *Minéralogie ;* 2° en corps organisés comprenant les végétaux et les animaux qui sont du domaine de la *Botanique* et de la *Zoologie.*

Ces différentes sciences ne sont point arrivées d'un pas uniforme à leur état actuel. Long-temps leurs progrès ont été retardés par des obstacles, dont le plus puissant a été la fausse direction des études.

En Physique, l'homme trop impatient de connaître, trop confiant dans ses propres forces, chercha moins à étudier la nature qu'à la deviner; aussi le fruit de ses travaux n'a été, pendant plusieurs siècles, qu'une suite de systèmes plus ou moins bizarres, dont il ne reste aujourd'hui que le souvenir pour servir de leçon.

En Chimie, l'idée de la transmutation des métaux et, plus tard, l'espoir plus chimérique encore de la découverte d'un remède universel, ont rendus infructueux les travaux de plusieurs siècles.

En Histoire Naturelle, les savans, bornés pendant long-temps à la considération trop exclusive des caractères extérieurs ou des propriétés secondaires, ne produisaient que des nomenclatures toujours incomplètes, où les espèces les plus éloignées par leur nature se trouvaient quelquefois rapprochées; tandis que des substances de même nature, et souvent identiques, se trouvaient séparées d'après de simples apparences accidentelles.

On s'aperçut, à la fin, que, pour connaître les phénomènes de la nature, il fallait les observer avec soin, et ne rien déduire des observations au delà de ce qu'elles indiquaient rigoureusement; que l'imagination de l'homme était un guide trompeur, et que l'explication de la plupart des faits naturels ne pouvait être que le fruit des travaux de plusieurs générations. C'est depuis lors seulement que les sciences physiques ont marché d'un pas assuré, et qu'elles ont fait des progrès rapides par des découvertes successives, revêtues de ce caractère de stabilité qui n'appartient qu'à la vérité seule.

L'Histoire Naturelle n'est devenue une véritable science que lorsqu'on a pris les caractères génériques et spécifiques dans la structure ou l'organisation. Ainsi la Minéralogie n'a présenté quelque certi-

tude qu'après le perfectionnement de l'analyse chimique et la belle découverte de Haüy sur la structure des cristaux, qui permirent de donner de l'espèce minérale une définition claire et précise. Ainsi la Botanique, par l'observation des parties sexuelles des plantes, et la juste appréciation des organes de la fructification, a présenté une nomenclature raisonnée. Ainsi, depuis les progrès modernes de l'anatomie comparée, science qui est redevable à M. Cuvier de tant de brillans succès, la Zoologie s'est élevée au rang qu'elle était appelée à occuper dans la série des connaissances humaines.

Toutes les sciences étant donc enfin soumises à une marche régulière et invariable, la chose la plus importante pour nous est d'examiner avec soin la méthode employée dans les recherches physiques, afin de nous familiariser avec elle et de pouvoir la prendre pour guide pendant la durée de ce cours.

Nous avons dit, plus haut, que dans les sciences naturelles le but qu'on se propose est de connaître avec précision les phénomènes et leurs lois, pour découvrir ensuite les faits primitifs autour desquels ils viennent se grouper.

Le premier de ces deux objets, c'est-à-dire, la détermination des lois des phénomènes, ne peut être rempli qu'au moyen d'un grand nombre d'observations faites avec la précision la plus grande. Quelquefois la loi est simple, évidente et facile à reconnaître : telle est celle de l'ascension des liquides dans les tubes capillaires. A la seule inspection des hauteurs observées et des diamètres des tubes correspondans, on voit que les hauteurs sont en raison inverse des diamètres. Mais, plus souvent, les lois sont compliquées, et ce n'est que par une suite de tâtonnemens qu'on parvient à les découvrir : telle est, par exemple, la troisième loi de Képler relative à la durée des révolutions des planètes, comparée aux grands axes de leurs orbites; loi dont la découverte a coûté à ce grand astronome dix-sept ans de travaux.

On ne doit jamais perdre de vue, dans ces recherches, que l'imperfection de nos organes et de nos instrumens ne nous permet pas de faire des observations d'une exactitude absolue ; elles ne satisfont jamais rigoureusement aux lois qui les régissent; on doit exiger seulement que les différences soient plus petites que les erreurs probables des instrumens. Il faut aussi que la série des observations soit très-étendue ; car on risquerait sans cela d'obtenir, non une loi générale, mais une loi qui ne serait applicable que dans la période observée : telle est celle de Newton sur le refroidissement, laquelle, n'ayant été déduite que d'observations faites à des températures au-dessous de celle de l'ébullition, n'est pas applicable à des températures supérieures.

Les lois des phénomènes étant trouvées, on doit chercher à s'élever au delà; quelquefois elles conduisent nécessairement à la connaissance de la cause générale : telles sont les trois lois de Képler, d'où, sans aucune supposition, on a déduit l'attraction qui régit le système du monde. Mais, le plus souvent, les rapports découverts entre les phénomènes ne sont pas assez nombreux pour en déduire la cause qui les produit; alors il faut deviner, et vérifier ensuite; il faut créer des hypothèses, et celle-là seule, dont les lois observées sont des conséquences nécessaires, sera probable : elle le sera d'autant plus qu'il y aura moins d'hypothèses possibles, et que les phénomènes seront plus nombreux et plus compliqués.

On voit, d'après cela, combien les recherches physiques sont pénibles et difficiles, combien elles exigent d'exactitude et de sagacité ; mais aussi, en suivant cette méthode, on arrivera infailliblement à la supposition la plus probable, qui pourrait même tenir lieu de la vérité, si elle ne se confondait pas avec elle.

C'est ainsi que, par des travaux multipliés, la physique s'est élevée au point où elle est maintenant, et d'où elle ne peut plus descendre.

Le temps, en augmentant le nombre des observations, pourra perfectionner plusieurs de nos théories ; rendre certaines celles qui ne sont encore que probables ; substituer à quelques-unes, d'autres plus voisines de la vérité ; mais ce qui est regardé aujourd'hui comme vrai, ne pourra jamais être changé ; jamais les lois, qui sont l'expression fidèle des observations, ne pourront être altérées.

L'exposé que nous venons de faire peut laisser apercevoir combien les connaissances mathématiques sont indispensables au physicien, et dans les observations et dans la découverte des lois, surtout lorsqu'on veut descendre des causes à l'explication des phénomènes.

Souvent les faits que l'on se propose d'observer ne peuvent être isolés l'un de l'autre ; car les phénomènes apparens sont dus à plusieurs causes qui, agissant à la fois, modifient réciproquement les effets qui seraient produits par chacune d'elles. Alors il faut, des résultats immédiats des observations, retrancher ce qui est dû à la cause qu'on n'a pu écarter, et c'est dans ce cas que les considérations mathématiques sont nécessaires.

Mais elles le sont d'une manière encore plus absolue dans la détermination des lois. Celles-ci sont souvent compliquées ; elles ne peuvent s'énoncer que difficilement par le langage ordinaire, et leur vérification exige l'emploi des moyens analytiques. Mais c'est principalement lorsqu'on veut déduire les phénomènes de leur cause, que l'analyse algébrique est obligée de venir au secours du raisonnement. En effet, lorsqu'on part d'un principe quelconque et que, par une série d'inductions, on est obligé d'arriver à une certaine conséquence, l'esprit humain peut facilement suivre cette marche lorsque les points intermédiaires ne sont pas trop nombreux ; mais il y a toujours pour chaque individu, une certaine limite qu'il ne peut dépasser. Au delà, l'esprit, fatigué, perd de vue le point de départ et ne peut continuer sa route. Ainsi, avec le seul secours du raisonne-

ment, il est difficile de suivre l'intervalle qui sépare deux faits éloignés. Voilà pourquoi l'Arithmétique et la Géométrie synthétique ont atteint de bonne heure leur dernière limite; mais, avec le secours de l'Algèbre, la limite dont nous venons de parler peut facilement être franchie. Cette science donne le moyen, avec un petit nombre de principes fixes et invariables, de trouver les conséquences les plus éloignées d'un principe quelconque, sans que l'on soit obligé d'employer tous les raisonnemens intermédiaires.

Après ces explications indispensables, nous allons exposer la marche suivie dans cet ouvrage.

Les différentes parties qui composent la Physique y ont été classées dans l'ordre qui a paru le plus méthodique. La nécessité de ne point laisser de lacune dans cette longue série de phénomènes, nous a souvent contraint d'emprunter, à la mécanique et à l'astronomie, des résultats généraux que nous n'avons point cherché à démontrer. Partout ailleurs on a procédé avec le raisonnement seul, toutes les fois que cela a été possible; on a insisté principalement sur les parties de la Physique qui ont des applications dans les arts, et toujours les théories ont été résumées dans des tableaux synoptiques qui ont paru avoir le double avantage de montrer l'enchaînement des faits et de les graver dans la mémoire (1).

Voici l'ordre suivi dans la distribution des matières:

La Physique, ainsi que nous l'avons déjà dit, se compose de l'étude des propriétés générales des corps pondérables, et de l'étude des propriétés particulières des fluides impondérables; de là les deux grandes divisions de la Physique.

Dans la première on examinera d'abord les propriétés nécessaires

(1) Les détails qui ne sont point à la portée de tout le monde ont été mis en petit caractère. Le texte *Cicéro* forme ainsi un traité élémentaire, et les deux textes réunis un traité aussi complet que le permet le cadre dans lequel nous devons nous renfermer.

des corps pondérables, puis les forces permanentes qui agissent sur eux, savoir : l'Attraction et la Force élastique de la Chaleur. Et, comme c'est l'action simultanée de ces deux forces sur les corps qui produit les différens états sous lesquels ils se présentent, nous serons naturellement conduits à étudier successivement les Corps solides, liquides et gazeux.

Dans la seconde partie, celle qui traite des Fluides impondérables, on examinera successivement la Chaleur, l'Électricité, le Magnétisme, le Galvanisme et la Lumière.

TABLEAU DE LA DIVISION DU COURS.

I.re PARTIE.

Corps pondérables.	Propriétés nécessaires.	Étendue		Chapitre I.er
		Impénétrabilité		
		Mobilité		
		Divisibilité		
	Forces permanentes qui agissent sur les corps	Attraction.	Gravitation	Ch. II.
			Pesanteur	
			Attr. moléculaire.	
		Force répulsive de la chaleur.		
	Propriétés générales des corps	Solides		Ch. III.
		Liquides		Ch. IV.
		Gazeux		Ch. V.

II.e PARTIE.

Fluides impondérables.	Chaleur	Ch. I.er
	Électricité	Ch. II.
	Magnétisme	Ch. III.
	Galvanisme	Ch IV.
	Lumière	Ch. V.

COURS DE PHYSIQUE.

PREMIÈRE PARTIE.

Propriétés générales des Corps pondérables.

CHAPITRE I.er

Propriétés nécessaires des Corps pondérables.

1. LES Corps pondérables se présentent sous trois états différens; tantôt ils ont une forme extérieure fixe, qu'on ne peut leur faire abandonner qu'en employant un effort plus ou moins considérable; tantôt leurs différentes parties cèdent facilement à la plus petite pression, et prennent la forme des vases qui les renferment; d'autres fois, enfin, semblables à l'air, les parties qui les constituent paraissent totalement dépourvues d'adhérence: sous ces différentes formes, les corps prennent les noms de *Corps Solides*, *Corps Liquides*, *Corps Gazeux*.

2. On désigne sous le nom de Propriétés nécessaires, les propriétés sans lesquelles nous ne pourrions concevoir l'existence de ces corps ; elles sont au nombre de quatre, savoir : l'*Étendue*, l'*Impénétrabilité*, la *Mobilité* et la *Divisibilité*.

§ I.

L'Étendue.

3. Tous les corps occupent nécessairement un certain lieu ; ce lieu est leur étendue : les propriétés de l'étendue sont l'objet de la Géométrie. L'étendue a nécessairement trois dimensions : la longueur, la largeur et la profondeur. On considère cependant, en Géométrie, des surfaces qui n'ont que deux dimensions, des lignes qui n'en ont qu'une, et des points qui sont dépourvus de toutes les trois ; mais ce sont des abstractions comparables à celles de l'Arithmétique, les surfaces, les lignes et les points n'existant pas plus dans la nature que les nombres.

4. *Instrument pour mesurer l'étendue.* Nous ne donnerons aucun détail sur les propriétés géométriques de l'étendue; nous pensons, cependant, qu'il est utile de décrire les instrumens qu'on emploie pour la mesurer avec précision.

Tout se réduit, en dernière analyse, à mesurer des lignes droites et des angles. On mesure les premières en promenant sur leur longueur l'unité linéaire; opération qui s'exécute à l'aide d'un compas à ressort (*fig.* 1), lorsque l'unité a de petites dimensions, et avec un compas à verge (*fig.* 2), lorsque la ligne de comparaison est trop grande pour pouvoir être donnée par l'écartement du compas à ressort. Lorsque la ligne qu'on veut mesurer ne contient pas un nombre exact de fois l'unité de longueur, on détermine la fraction excédante au moyen d'une règle divisée sur laquelle on la rapporte.

Un angle se mesure par le nombre de degrés renfermés dans l'arc de cercle compris entre ses côtés et décrit de son sommet comme centre (*fig.* 3). Le cercle se divise en 360 degrés, chaque degré en 60 minutes, et chaque minute en 60 secondes.

Lorsque les lignes et les arcs ne correspondent pas exactement aux divisions tracées sur l'unité de longueur, ou sur le limbe de l'instrument, on emploie, pour estimer la petite fraction excédante, un appareil fort ingénieux, imaginé par un géomètre nommé Vernier, et qui a conservé le nom de son auteur.

5. *Vernier.* Soit A B (*fig.* 4) une règle divisée en 10 parties égales ; C D une autre règle dont la longueur est égale aux $\frac{9}{10}$ de la première, et divisée aussi en 10 parties égales. Les extrémités A et C des deux règles étant placées sur la même ligne, il est évident que les divisions correspondantes, en allant de gauche à droite, seront séparées par des intervalles, qui iront en croissant de $\frac{1}{10}$ de division de la grande

ligne, c'est-à-dire que les distances 1,1'; 2,2'; 3,3'; 4,4' ... 10,10' seront $\frac{1}{10}$, $\frac{2}{10}$, $\frac{3}{10}$, $\frac{4}{10}$ ... $\frac{10}{10}$ d'une des divisions de la ligne A B. Il suit de là, que la distance d'une division de la ligne inférieure à la suivante de la ligne supérieure, est d'autant de dixièmes qu'il y a de divisions jusqu'à celles qui coïncident, en allant de droite à gauche. De même, en allant de droite à gauche, l'intervalle des divisions 8,9'; 7,8', 6,7'; 5,6'; ... est de $\frac{1}{10}$, $\frac{2}{10}$ ...; et la distance entre l'une quelconque des divisions de la ligne supérieure et la suivante de la ligne inférieure, est d'autant de dixièmes qu'il y a de divisions jusqu'à la première coïncidence, en allant de gauche à droite.

D'après cela on conçoit que si, après avoir porté sur la ligne M N (*fig.* 5) l'unité de mesure depuis M jusqu'en K, on voulait estimer la partie K N en dixièmes de cette unité, il faudrait placer au point K une règle B A renfermant dix fois l'unité de longueur, et au point N une autre règle dont la longueur, égale à neuf unités, serait divisée en 10 parties égales. On compterait le nombre de divisions jusqu'à la première coïncidence, et ce serait le nombre de dixièmes cherché. Si la règle auxiliaire embrassait 19 divisions et était divisée en 20 parties égales, on obtiendrait des vingtièmes, et ainsi de suite.

Tout ce que nous venons de dire est immédiatement applicable à la mesure des arcs de cercle : aussi tous les instrumens qui servent à mesurer les angles, portent à l'extrémité du rayon ou du diamètre mobile, qu'on désigne sous le nom d'Alidade, une portion de cercle qui s'applique exactement sur le limbe, et sur lequel est tracé le Vernier (*fig.* 6.)

6. *Machine à diviser les lignes droites.* La division d'une ligne en parties égales est une opération souvent nécessaire, et qui présenterait, avec les moyens ordinaires, de très-grandes difficultés et des tâtonnemens réitérés si l'on voulait l'exécuter avec une certaine précision. Mais au moyen de la machine que nous allons décrire, cette opération devient d'une extrême simplicité, et donne en même temps une approximation toujours suffisante.

Soit A B C D (*fig.* 7) un plateau de bois; E F une vis de rappel, mobile dans deux coussinets fixes en E et F. La rotation de la vis se détermine au moyen d'une manivelle K; le cercle P P' qui tourne avec la vis est destiné à mesurer, au moyen de l'index fixe M, les tours et les fractions de tour de la vis; dans cette vis s'engage un écrou H embrassant un grand nombre de pas. A cet écrou sont fixés deux règles G et L, la première horizontale, la seconde garnie, à la partie inférieure, d'échancrures demi-circulaires qui s'appliquent exactement sur celles qui sont pratiquées dans le plateau, et qui sont désignées par les lettres r r' r'' r'''.

Lorsqu'on veut diviser une ligne tracée sur une plaque, on la fixe sur la partie antérieure du plateau, de manière que la règle G en soit à une petite distance; au moyen de la manivelle on amène la règle mobile G à une des extrémités de la ligne



à diviser, et on la lui fait parcourir en totalité. On divise alors le nombre de tours et de fractions de tour employés pour cette opération, par le nombre de divisions qu'on veut effectuer; ce qui donne le nombre de tours correspondant à chaque division, qu'on peut tracer avec un burin, en faisant marcher successivement l'écrou de la quantité qui correspond à chaque division.

La partie postérieure du plateau sur laquelle s'applique la règle L, est destinée à la graduation des cylindres.

Au moyen de cet appareil, on peut atteindre à une très-grande précision; mais il faut que la vis soit construite avec la plus grande régularité.

§ II.

De l'Impénétrabilité.

7. Deux corps ne peuvent occuper en même temps le même lieu : c'est cette propriété qu'on désigne sous le nom d'*Impénétrabilité*.

8. Quoique cette propriété de la matière soit évidente, il se présente quelquefois des circonstances où elle paraît être en défaut : ces illusions proviennent uniquement de ce que l'on confond le lieu d'un corps avec son volume apparent. Ce dernier est toujours plus grand; car les parties matérielles qui constituent les corps ne se touchent jamais. On concevra facilement, d'après cela, pourquoi un grand nombre de corps peuvent absorber des liquides sans augmenter sensiblement de volume, et pourquoi plusieurs liquides, en se combinant, diminuent de volume. Dans le premier cas, le liquide s'introduit dans les pores; dans le second, les parties matérielles se rapprochent, et dans aucun il n'y a pénétration réelle.

§ III.

De la Mobilité.

9. Un corps est en mouvement lorsqu'il passe d'un lieu dans un autre. On ignore complétement ce qu'un corps éprouve lorsqu'il cesse d'être en repos. On sait seulement que les corps ne jouissent pas de la propriété

de se mouvoir d'eux-mêmes, et que leurs mouvemens sont toujours produits par des causes qui leur sont étrangères.

A. *Considérations générales sur les Forces.*

10. *Définition des forces.* On désigne sous le nom de *Force* la cause quelconque du mouvement.

11. *Vitesses.* Lorsqu'un corps est en mouvement, et que, dans des temps égaux, il parcourt des espaces égaux, ou, en d'autres termes, que les espaces parcourus sont proportionnels aux temps, on dit que le mouvement est uniforme ; et on appelle vitesse l'espace parcouru dans l'unité de temps.

12. *Deux espèces de forces.* On distingue deux espèces de forces, les forces constantes et les forces accélératrices. Les premières n'agissent qu'à l'origine du mouvement, et par une seule impulsion ; les autres agissent continuellement pendant toute la durée du mouvement, et par une suite de petites impulsions qui se succèdent d'une manière continue.

On peut considérer les actions des forces accélératrices comme séparées les unes des autres par des temps très-petits, et, par conséquent, les mouvemens produits par ces forces comme le résultat d'une série de forces constantes qui se succèdent après des intervalles très-courts. Nous faisons ici une abstraction absolument semblable à celle dont on se sert en Géométrie pour déterminer les propriétés des lignes courbes : on les considère comme formées d'un grand nombre de petites lignes droites.

Ainsi, toutes les propriétés du mouvement d'un corps sollicité par une seule impulsion initiale, appartiendront au mouvement d'un corps mu par une force accélératrice, mais seulement pendant un temps infiniment petit.

13. *Inertie.* Considérons d'abord le mouvement d'un point matériel : il est évident que la matière ne pouvant se mouvoir d'elle-même, un point matériel devra obéir à la force qui agit sur lui, et se mouvoir dans la direction rectiligne de cette force, attendu qu'il n'y a pas de raison pour qu'il s'en écarte d'un côté plutôt que de l'autre. Mais il

nous est impossible de savoir *a priori* si le point matériel conservera la vitesse qui lui a été imprimée d'abord ; car nous ne connaissons ni la nature des forces ni leur manière d'agir dans la production du mouvement. C'est l'expérience seule qui peut nous éclairer sur cet objet. En observant les mouvemens des corps, on remarque qu'ils persévèrent dans leur vitesse primitive d'autant plus que les obstacles sont moins nombreux ; ce qui fait présumer que, si l'on parvenait à détruire entièrement ces obstacles, les corps conserveraient indéfiniment leur vitesse initiale. Mais l'observation des phénomènes célestes donne une solution précise de la question. Depuis un grand nombre de siècles, les mouvemens des corps célestes n'ont pas éprouvé la moindre altération, et, par conséquent, la vitesse dont ils étaient animés à l'époque des plus anciennes observations, s'est perpétuée jusqu'ici dans toute son intensité.

On peut donc regarder comme une loi générale que les corps, par eux-mêmes, ne peuvent sortir du repos ni altérer leur mouvement rectiligne et uniforme : c'est cette loi qu'on désigne sous le nom d'*Inertie*.

14. *Les forces sont proportionnelles aux vitesses.* Cherchons maintenant la relation qui existe entre la cause et l'effet, entre la force et la vitesse. Le rapport le plus simple serait celui dans lequel les forces seraient proportionnelles aux vitesses ; mais rien n'indique *a priori* que cette relation est celle qui existe réellement. C'est encore à l'expérience qu'il faut avoir recours.

Si les forces sont proportionnelles aux vitesses, il en résulte que les mouvemens relatifs d'un système de corps ne seront point altérés, lorsqu'une même force agira sur tout le système. Par exemple, lorsque des corps se meuvent sur une même ligne droite, les mouvemens relatifs sont produits par la différence des vitesses, et cette différence n'est point altérée lorsque chacune des forces est augmentée de la même quantité. Réciproquement, si les mouvemens relatifs d'un système de corps ne sont point altérés par une impulsion commune à tout le système, on peut en conclure que les vitesses sont proportionnelles aux forces ; car, en prenant toujours pour exemple des corps qui se meuvent sur une même ligne droite, si les forces ne sont pas proportionnelles aux vitesses, si

elles sont comme les carrés des vitesses, les premières forces étant comme 1 et 2, les vitesses seront comme 1 et 4, et, après l'impulsion commune, représentée par 1, les forces étant 2 et 5, les vitesses seront comme 4 à 25, et, par conséquent, les mouvemens relatifs seront altérés. Il en serait de même de tout autre rapport entre la force et la vitesse.

Or, on a observé à la surface de la terre que les mouvemens relatifs des corps ne sont point altérés par des forces communes : une montre marche dans un lieu fixe comme dans un navire en mouvement, quelles que soient d'ailleurs sa vitesse et sa direction. Nous pouvons donc en conclure que les forces sont proportionnelles aux vitesses.

15. *Les forces sont proportionnelles aux masses.* Examinons actuellement l'action d'une force sur un corps. Lorsqu'un corps se meut de manière que tous ses points décrivent des lignes droites parallèles, si on conçoit ce corps divisé en un grand nombre de petites parties égales et la force divisée en un même nombre de parties égales, le mouvement de chacune de ces parties pourra être attribué à une des parties de la force totale qui y serait immédiatement appliquée. La force totale égale à la somme de toutes ces petites forces, deviendrait double, triple, si la masse du corps croissait dans le même rapport. Ainsi les forces qui imprimeraient la même vitesse à des corps de même nature, mais de différentes masses, devraient être dans le rapport de ces masses.

16. *Les forces agissent de la même manière sur tous les corps.* Il ne reste plus maintenant qu'à déterminer si une même force agissant successivement sur des masses égales de différente nature, leur imprimerait la même vitesse : c'est ce qui existe en effet. Plus tard nous verrons que la pesanteur, les impulsions provenant du choc et, en général, toutes les autres forces, produisent des effets qui dépendent uniquement de la masse des corps et jamais de leur nature.

17. *Les forces se mesurent par les produits des masses par les vitesses.* Les forces qui agissent sur des masses égales étant proportionnelles aux vitesses, et celles qui impriment des vitesses égales étant proportionnelles aux masses, on en conclut qu'elles sont dans le rapport des produits des masses par les vitesses.

En effet, soit deux forces F et F' agissant sur les masses m et m', auxquelles elles impriment les vitesses v et v', considérons une troisième force F'' qui en agissant sur la masse m, lui imprime la vitesse v'. Nous aurons, en comparant la première avec la troisième, F : F'' :: v' : v; et, en comparant la deuxième avec la troisième, F'' : F' :: m: m' : en multipliant ces deux proportions, et en supprimant le facteur commun F'', il viendra F : F' :: mv : $m'v'$.

18. Ces produits servent à comparer les intensités des forces et portent le nom de *Quantité du Mouvement.* On voit, d'après cela, que, lorsqu'une même force agit successivement sur des masses inégales, la quantité du mouvement doit être constante, et, par conséquent, la vitesse et la masse doivent varier en raison inverse l'une de l'autre.

19. Quant aux forces accélératrices, la vitesse qu'elles impriment à un corps varie continuellement, et pour mesurer l'intensité de la force à un instant donné, il faudrait qu'à cet instant la force accélératrice cessât d'agir; le corps, en vertu de l'inertie, se mouvant uniformément avec la vitesse acquise, et la force se mesurerait par le produit de cette vitesse par la masse.

B. *Composition des Forces qui sollicitent un point matériel.*

20. *Résultante.* Un point sollicité par plusieurs forces ne pouvant suivre qu'une seule direction avec une certaine vitesse, on peut toujours remplacer le système des forces qui agissent sur lui, par une seule qui produirait le même effet. Cette force prend le nom de *Résultante.*

21. *Résultante des forces qui agissent dans la même direction.* Lorsque plusieurs forces agissent suivant la même direction et dans le même sens, il est évident que la résultante est égale à leur somme : s'il y en a qui agissent en sens contraire, la résultante sera égale à la différence des sommes de celles qui agissent dans le même sens.

22. *Résultante des forces dont les directions sont inclinées.* Si un point A (*fig.* 8) est sollicité par des forces P et Q, il est évident que la résultante doit être dans le plan des deux lignes A P et A Q : car il n'y a pas de raison pour qu'elle soit plutôt au-dessus qu'au-dessous. Le procédé pour la trouver en grandeur et en direction, consiste : 1° à prendre,

sur la direction de ces deux forces, deux lignes A B et A C qui soient dans le rapport des forces ; 2° à mener par les points B et C des lignes parallèles à la direction de l'autre force. La diagonale A D du parallélogramme A B D représente alors en grandeur et en direction la résultante cherchée.

Ce théorème est démontré dans tous les traités de statique et de mécanique ; mais on peut encore le vérifier, au moyen d'un appareil assez simple (*fig.* 9). M et N sont des poulies fixes sur lesquelles s'enroulent des cordons tendus par les poids P et Q. Ces cordons transmettent leur tension à deux tiges métalliques, mobiles autour d'une charnière A, commune à une autre tige portant à son extrémité le poids R. Ces trois tiges sont divisées en parties égales. Deux autres règles D P et D Q, mobiles autour de la charnière D et également divisées, se fixent sur les deux premières, de manière à former le parallélogramme D B A C dans lequel B A et A C sont proportionnelles aux forces P et Q. On observe alors que, dans la position d'équilibre, la verticale A D du poids R est dirigée suivant la diagonale du parallélogramme A B D C, et que le poids R est proportionnel à la longueur de cette diagonale. Or, le poids R faisant équilibre aux deux forces P et Q, doit être égal et directement opposé à la résultante des forces P et Q : cette résultante jouit donc de la propriété énoncée.

23. Il résulte de cette construction, que les forces P et Q (*fig.* 8) sont entre elles comme les perpendiculaires D M et D N abaissées d'un point de la résultante sur leur direction.

En effet, dans le triangle A B D les côtés A B et B D représentent les forces P et Q ; or, dans un triangle les côtés sont entre eux comme les sinus des angles opposés : les forces P et Q seront donc dans le rapport des sinus des angles B D A ou *b* et *a*, ou enfin dans celui des perpendiculaires D M et D N.

24. *Décomposition d'une force en deux autres.* On pourrait aussi décomposer une force R en deux autres dont les directions seraient données : il suffirait, pour obtenir leur intensité, de mener par le point D (*fig.* 8) les lignes D B et D C parallèles aux directions des forces données ; A B et A C représenteraient leur intensité.

25. *Résultante de plusieurs forces situées dans le même plan.* Si plusieurs forces P, Q, R, S (*fig.* 10), situées dans un même plan, agissaient sur un même point O, on pourrait trouver leur résultante finale en cherchant successivement la résultante D des deux premières A et B, puis celle de D et de C, ainsi de suite ; mais il serait plus commode de décomposer chacune des forces suivant deux axes rectangulaires X et Y. On aurait alors deux systèmes de forces agissant suivant ces axes. La résultante de chacun d'eux serait évidemment égale à leur somme, et on obtiendrait la résultante finale en construisant le parallélogramme O X R Y, sur les lignes O X, O Y, qui représenteraient les intensités des forces qui agissent suivant ces axes.

26. *Résultante de 3 forces situées dans des plans différens.* Si on avait trois forces agissant suivant trois droites O X, O Y, O Z (*fig.* 11), dirigées d'une manière quelconque dans l'espace, la résultante s'obtiendrait en cherchant d'abord celle des forces O B et O C, et ensuite celle des forces O F et O D. La résultante finale se trouverait être alors la diagonale du parallélipipède construit sur les lignes O C, O D et O B qui représentent les forces initiales.

27. *Décomposition d'une force en 3 autres.* Réciproquement on pourrait décomposer la force en 3 autres qui, agissant suivant 3 droites quelconques, passeraient par le point O et produiraient le même effet. On déterminerait son intensité en construisant le parallélipipède O E ; et, pour cela, il faudrait par le point E mener 3 droites E F, E H, E G, dirigées parallèlement aux 3 droites O Z, O Y, O X.

28. *Résultante d'un nombre quelconque de forces.* Si un certain nombre de forces, dirigées d'une manière quelconque dans l'espace, agissaient sur le point O (*fig.* 12), on pourrait trouver la résultante totale en composant les deux premières, puis cette première résultante avec la troisième, et ainsi de suite. Mais il est plus commode de suivre un procédé analogue à celui que nous avons indiqué pour le cas où ces forces sont dans le même plan. Par le point O, on mène trois axes O X, O Y, O Z, perpendiculaires entre eux ; on décompose chaque force en 3 autres qui agissent suivant ces axes : les forces primitives sont alors transformées en

3 nouvelles forces, dirigées suivant les axes et dont on peut facilement trouver la résultante.

29. Si le point doit rester en équilibre par ces seules forces, la résultante devra être nulle; s'il doit y rester par une résistance, la résultante devra être perpendiculaire à la surface du corps résistant.

C. *Forces qui agissent sur des points liés entre eux d'une manière invariable.*

30. *Résultante de 2 forces quelconques.* Soit P et Q (*fig.* 13) deux forces appliquées aux points A et B d'un corps solide. Pour qu'il y ait une résultante unique, il faut que les directions de ces deux lignes soient dans le même plan; dans ce cas, on prolongera leur direction jusqu'à leur point de rencontre. Si on imagine ce point invariablement fixé au corps, on pourra y appliquer les deux forces P et Q, parce que l'effet d'une force n'est point altéré lorsqu'on transporte son point d'application en un point quelconque de sa direction. On obtiendra alors là résultante R, dont on transportera le point d'application en un point quelconque de R C.

31. *Résultante de 2 forces parallèles agissant dans le même sens.* Si les forces P et Q (*fig.* 14) étaient parallèles et agissaient dans le même sens, on ne pourrait pas trouver la résultante par le moyen précédent, puisque leurs directions ne se rencontrent point. Dans ce cas on démontre, en mécanique, que la résultante est égale à leur somme et se trouve appliquée au point C qui divise la ligne A B en parties réciproquement proportionnelles aux forces P et Q; de sorte qu'on a la proportion P : Q : : B C : A C.

On peut vérifier cette proposition au moyen de l'appareil représenté (*fig.* 15). A B est une barre inflexible; les forces P et Q sont deux poids inégaux qui tirent les cordons A M et B N verticalement, au moyen des poulies fixes M et N; R est un poids attaché à l'extrémité d'un fil suspendu en un point C de A B. On trouve, par l'expérience, que l'équilibre existe lorsque le poids R est égal à la somme des poids P et Q, et lorsque le point d'application divise la ligne A B en parties récipro-

quement proportionnelles aux poids P et Q. Or, le poids R doit être égal et directement opposé à la résultante : cette dernière satisfait donc aux conditions précédentes.

32. *Résultante de 2 forces parallèles agissant dans des sens différens.* Si les forces étaient parallèles et agissaient en sens contraire (*fig.* 16), la résultante serait égale à leur différence, elle serait dirigée dans le sens de la plus grande, et aurait son point d'application sur le prolongement de la ligne A B en un point C, tel que C B et C A fussent en raison inverse des forces Q et P, et le point C serait d'autant plus éloigné que les forces P et Q différeraient moins l'une de l'autre : de sorte que la la résultante de ces dernières étant égale, serait située à une distance infinie, ce qui veut dire qu'elle n'existe pas.

On peut encore démontrer ce résultat du calcul, par un appareil semblable à celui que nous venons de décrire. Les forces parallèles et opposées (*fig.* 17), sont produites par les poids P et Q. Le poids R qui doit faire équilibre à ces deux forces et qui est égal et opposé à la résultante, doit, pour remplir cette condition, être égal à la différence des deux forces et être appliqué en un point qui remplisse les conditions déjà énoncées.

33. *Résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles.* D'après ce qui précède, il serait facile de trouver la résultante unique d'un nombre quelconque de forces qui agiraient sur des points invariablement fixés entre eux. Il suffirait de les composer successivement deux à deux par les règles que nous avons exposées.

Cette résultante totale sera égale à leur somme, si elles sont dirigées dans le même sens; et, dans le cas contraire, à la différence de la somme de celles qui agissent dans un sens et de celles qui agissent dans l'autre. Le point d'application de la résultante étant déterminé uniquement par la considération des points d'application des forces et de leur grandeur, ce point est indépendant de leur direction; il restera donc dans le même lieu, si on suppose que les forces s'inclinent d'une manière quelconque en conservant leur parallélisme. Le point d'application de la résultante d'un système de forces parallèles se nomme *Centre des forces parallèles :* sa considération est d'une très-haute importance dans un grand nombre de phénomènes.

34. Il est évident que si le corps doit être en équilibre par ces seules forces, la résultante de toutes les forces, moins une, doit être égale et appliquée au même point, mais dirigée en sens contraire de la dernière.

35. Si l'équilibre doit être produit par la résistance d'un point d'une surface ou d'un corps, la résultante finale doit passer par ce point ou être perpendiculaire à la surface résistante.

36. Il arrive quelquefois qu'il n'y a pas de résultante unique, et que, par conséquent, l'équilibre ne peut être établi par une force unique. C'est le cas de deux forces égales et parallèles qui ne sont pas appliquées aux mêmes points. Tous les autres se réduisent à celui-là.

D. *Mouvement d'un point matériel.*

37. Si un point matériel est soumis à l'action d'une ou de plusieurs forces qui, après lui avoir imprimé une impulsion quelconque, l'abandonnent à lui-même, en vertu de son inertie il se mouvra indéfiniment dans la direction et avec la vitesse initiale. Si un point matériel A (*fig.* 18) était, à différentes époques, sollicité par les nouvelles forces P, Q, R, les directions A B, B C, C D, D F, qu'il prendrait successivement, seraient les résultantes successives des forces A, P, Q, R.

38. *Mouvement curviligne.* Lorsqu'un point matériel est sollicité par une impulsion initiale et par une force accélératrice, si cette dernière n'agit pas dans la direction de la première, le point matériel décrit une suite de petites lignes droites qui sont, comme dans la fig. 18, les résultantes successives. Mais, comme ici les actions de la force accélératrice se succèdent d'une manière continue, ces lignes droites sont infiniment petites, et leur ensemble forme une ligne courbe. C'est ainsi, par exemple, que la pesanteur fait décrire une ligne courbe à un projectile lancé obliquement.

39. *La vitesse n'est pas toujours accélérée.* Dans le cas dont il s'agit, il arrive souvent que la vitesse réelle, au lieu d'être accélérée, diminue

à chaque instant, du moins dans une partie du mouvement ; ainsi, par exemple, un projectile lancé verticalement, ou dans une direction quelconque inclinée à l'horizon, s'élève avec une vitesse qui va en diminuant, et ne reprend une vitesse accélérée que lorsqu'il retombe.

40. *Principe de la moindre action.* Lorsqu'un point matériel peut décrire ainsi des trajectoires curvilignes, on démontre par le calcul que, pour arriver d'un point à un autre, il choisit toujours celle dans laquelle la somme des produits de sa masse par sa vitesse et par l'élément de la courbe est au minimum ; de sorte que, si la vitesse reste constante, il parvient d'un point à un autre par le chemin le plus court. C'est cette propriété qu'on a désignée sous le nom de *Principe de la moindre action.* Nous verrons, par la suite, de nombreuses applications de ce principe.

Nous n'examinons pas maintenant le mouvement d'un système de de points matériels : il en sera question plus tard lorsque nous considérerons les corps dans leurs différens états.

§ IV.

De la Divisibilité.

41. *Étendue de la divisibilité.* Tous les corps sont divisibles, et, pour un grand nombre, la division peut être portée jusqu'à un point qui effraie l'imagination.

Par exemple, l'or peut être réduit en lames tellement minces qu'une feuille de cinquante pouces carrés ne pèse qu'un grain (cinquante-huit milligrammes). Cette surface peut se diviser en deux millions de parties sensibles à l'œil.

Dans l'art du tireur d'or, la division va encore plus loin. Les fils d'argent dorés, dont on se sert pour la broderie, s'obtiennent en passant à la filière un cylindre d'argent recouvert de plusieurs lames d'or, dont le poids est d'une once (3 décagrammes) : on parvient à obtenir un fil aussi délié qu'un cheveu, dont tous les points de la surface sont recouverts d'or, et de la longueur de 444000 mètres, c'est-à-dire, de

111 lieues de 2000 toises. Ce fil s'aplatit au laminoir, et, alors, sa largeur est de $1/9$ de ligne; on peut donc considérer ce fil comme étant recouvert de deux lames d'or; ces lames pouvant être divisées en deux parties visibles, et chaque millimètre pouvant également être divisé en 8 parties appréciables, on obtiendra, par cette opération, 14 billions de parties visibles.

Les substances odorantes, dont plusieurs, après avoir répandu leurs émanations dans des espaces très-étendus, n'ont pas sensiblement diminué de poids, et une foule d'autres faits, attestent que, dans un grand nombre de circonstances, la division de la matière est portée jusqu'à une limite très-reculée.

42. *La matière n'est jamais divisée à l'infini.* Les philosophes se sont long-temps agités pour savoir si la matière est ou n'est pas divisible à l'infini. S'il s'agit seulement de la possibilité d'une division idéale et purement géométrique, il n'y a pas de doute qu'on ne puisse la concevoir indéfinie. Mais s'il est question de la division effective, nous ne pouvons rien affirmer; pour cela il faudrait connaître la nature intime des corps, et elle nous est complétement inconnue: d'ailleurs, c'est là une question entièrement métaphysique et qui n'a aucune importance pour nous.

Ce qui nous importe, c'est de savoir si, dans les différentes circonstances où la matière est divisée, elle l'est réellement à l'infini, ou s'il y a une limite qui n'est jamais dépassée.

43. En examinant les différens procédés mécaniques employés pour diviser la matière, on s'aperçoit bientôt que, par ces moyens, il est impossible de la diviser indéfiniment, quand bien même elle se prêterait à cette opération. D'ailleurs, tous les résultats de nos opérations mécaniques, de quelque ténuité qu'ils soient à la vue simple, examinés au microscope, paraissent susceptibles d'une plus grande division.

44. Les limites de la divisibilité sont encore plus reculées lorque les corps agissent les uns sur les autres. Par exemple, lorsqu'un sel est dissous par l'eau, les parties dans lesquelles le sel a été réduit sont si pe-

tites qu'elles échappent non-seulement à l'œil nu, mais encore à l'œil armé du plus fort instrument d'optique.

45. Dans cette opération la division est poussée au delà des limites de nos organes. Cependant on ne doit pas en conclure qu'elle l'ait été jusqu'à l'infini ; car, au delà de ce que nous pouvons apprécier directement, il y a une multitude de corps qui ont entre eux d'énormes différences de grandeur, et dont l'existence nous a été en partie révélée par le microscope. Les dimensions possibles des corps forment une série immense qui commence par le point géométrique, et s'étend indéfiniment au delà : nos organes ne peuvent saisir qu'une portion de cette série, et nous regardons comme nul ou infini tout ce qui n'y est pas renfermé ; mais ces jugemens, résultat nécessaire de l'imperfection de nos organes, n'expriment que les limites extrêmes de la perception. En général, il n'y a dans la nature ni grand, ni petit ; tout est relatif à l'individu qui observe : un ciron est un atome pour nous, c'est un monstre gigantesque pour l'infusoire, plusieurs millions de fois plus petit que lui.

Ainsi, de ce qu'il nous est impossible d'apercevoir les petits corps provenant de la division d'un sel par l'eau, nous ne pouvons pas en conclure que la division a été portée à l'infini, puisque cette division à pu s'arrêter à une infinité de termes inappréciables pour nous. Il est, au contraire, infiniment probable que la division dans ce cas atteint toujours une certaine limite et ne la dépasse jamais.

46. En effet, si on fait évaporer la dissolution saline, et que, parvenue à un certain degré de concentration, on l'abandonne à elle-même, on trouvera en général, au bout d'un certain temps, le fond du vase tapissé d'un grand nombre de petits corps réguliers, inégaux, mais tous semblables, c'est-à-dire, terminés par un même nombre de faces planes également inclinées entre elles. Nous ferons voir, par la suite, que ces corps, qu'on désigne sous le nom de Cristaux, sont formés par la réunion d'un très-grand nombre de corps très-petits et tous égaux entre eux. Or, ces petits corps ont dû exister dans le liquide avant la cristallisation ; et, pour cela, il faut nécessairement que la division n'ait pas atteint ces

petits corps, ou que, s'ils ont été divisés, ils se soient reformés avant la cristallisation. Cette dernière hypothèse est si peu probable que la première seule est admissible. En effet, la formation de ces petits corps dans l'intérieur du liquide peut être assimilée à une cristallisation intestine dont tous les cristaux, formés indépendamment les uns des autres, devraient atteindre exactement la même limite de grosseur. Pour concevoir le peu de probabilité de cette formation, admettons qu'il n'y ait que 4 de ces petits corps, et que chacun ne puisse prendre que 6 dimensions différentes, il y aurait 10626 combinaisons de grandeurs possibles, parmi lesquelles il n'y en a qu'une seule où ils sont tous égaux. Si on pense maintenant que le nombre de ces petits corps est très-considérable, que si la matière est divisible à l'infini, chacun d'eux pourra prendre une multitude de grosseurs différentes, on verra que la probabilité de la formation de ces petits corps est presque nulle ; et si on ajoute que non-seulement il faut que ces petits corps se forment dans l'expérience dont il s'agit, mais qu'il en soit ainsi dans toutes les cristallisations qui ont lieu journellement, on verra que les petits corps en question ne sont réellement point divisés, et que c'est là la limite qui n'est point dépassée.

D'ailleurs, la Physique et la Chimie présentent à chaque pas de nouvelles preuves de la division limitée de la matière ; et un grand nombre de phénomènes de cette science seraient tout-à-fait inexplicables dans la supposition contraire.

47. *Molécules.* Nous regarderons donc comme démontré, autant que cela peut l'être, que la matière n'est jamais divisée à l'infini, et nous désignerons sous le nom de *Molécules* les petits corps placés à la limite extrême de la division effective de la matière.

Nous verrons plus tard par quels moyens on peut, dans un grand nombre de cas, déterminer la forme des molécules des corps.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE I.er

Propriétés nécessaires des Corps pondérables.

ÉTENDUE		C'est le lieu occupé par les corps. L'étude de l'étendue constitue la Géométrie.
IMPÉNÉTRABILITÉ.		Elle consiste en ce que deux corps ne peuvent pas occuper en même temps le même lieu. Il faut distinguer le lieu réel du corps de son volume apparent.
MOBILITÉ		Elle consiste en ce que les corps peuvent être transportés d'un lieu dans un autre. On appelle force la cause du mouvement.
	Considérations générales sur les forces.........	Il y a deux espèces de forces : les forces constantes et les forces accélératrices. Les effets produits par les dernières peuvent être assimilés pendant un temps très-court à ceux produits par les premières. La vitesse est l'espace parcouru uniformément pendant l'unité de temps. *Inertie.* — C'est la conservation de la direction et de la vitesse initiale. Les forces constantes qui agissent sur des masses égales sont proportionnelles aux vitesses. Les forces qui agissant sur des masses inégales leur impriment les mêmes vitesses sont proportionnelles aux masses. Les forces agissent de la même manière sur tous les corps. Les forces constantes se mesurent au moyen du produit des masses par les vitesses.
	Composition des forces qui agissent sur un point....	Définition de la résultante. Résultante de plusieurs forces agissant dans la même direction. Résultante de deux forces agissant dans des directions différentes. Décomposition d'une force en deux autres. Résultante d'un nombre quelconque de forces.
	Composition des forces qui agissent sur un corps....	Résultante de deux forces inclinées. Id. d'un nombre quelconque de forces. Id. de deux forces parallèles. Id. d'un nombre quelconque de forces parallèles. Centre des forces parallèles. Dans le cas général il n'y a pas toujours une résultante unique.
	Mouvement d'un point matériel..	Rectiligne et uniforme lorsqu'il n'est produit que par des forces constantes simultanées. Lorsqu'un point est sollicité par des forces accélératrices et des forces constantes, la vitesse et la direction changent à chaque instant.
DIVISIBILITÉ....		Tous les corps sont divisibles, mais ils ne peuvent pas l'être indéfiniment. Il y a une limite qui n'est jamais atteinte dans les procédés mécaniques, et jamais dépassée dans les opérations chimiques. Les petits corps qui sont à la limite de la division effective de la matière, portent le nom de *Molécules.*

CHAPITRE II.

Forces permanentes qui agissent sur les Corps.

47. Parmi les différentes forces qui sollicitent les corps, il en est qui sont accidentelles et d'autres qui agissent continuellement sur eux, et auxquelles il est impossible de les soustraire. Les dernières sont au nombre de deux : l'Attraction, qui paraît une propriété inhérente à la matière, et la Force élastique de la chaleur.

L'attraction de la matière se manifeste dans toutes les circonstances. Elle porte les noms de *Gravitation*, de *Pesanteur* ou d'*Attraction moléculaire*, suivant qu'on la considère dans les corps célestes, dans les corps terrestres, ou dans les molécules.

La chaleur existe dans tous les corps. Toujours elle agit comme une force répulsive, et, par conséquent, elle tend à écarter les parties matérielles entre lesquelles elle agit. Les effets répulsifs de la chaleur ne se manifestent qu'à de très-petites distances sur les molécules d'un corps.

Nous allons examiner successivement la Gravitation, la Pesanteur, l'Attraction moléculaire et la Force élastique de la chaleur.

§ I.er *Gravitation.*

48. Les phénomènes célestes ont été les premiers vers lesquels l'observation s'est dirigée. Mais ce ne fut qu'après une nombreuse suite d'observations qu'on parvint à démêler les mouvemens relatifs des astres, au milieu du mouvement général qui semble emporter le ciel autour de nous. La durée des révolutions du soleil, de la lune et des planètes, et la détermination des périodes qui embrassent les nombreuses anomalies de leurs mouvemens, exigèrent plusieurs siècles de travaux. Long-temps les préjugés et l'ignorance des grandes lois de la mécanique firent regarder comme réels les mouvemens apparens, et l'idée, propagée pendant tant

de siècles, que les astres devaient décrire des orbites circulaires, parce que le cercle est la courbe la plus simple, fit admettre, dans les mouvemens du système du monde, une complication toujours croissante à mesure que de nouvelles observations faisaient découvrir de nouvelles anomalies. Enfin, le vrai système des mouvemens des corps célestes, émis déjà plusieurs fois, à différentes époques, fut présenté de nouveau par Copernic. Képler découvrit les trois grandes lois auxquelles sont soumis les mouvemens de tous les corps célestes, et Newton, en les combinant, en fit jaillir la loi unique à laquelle toute la nature est soumise, et qui, à elle seule, fait persévérer le système du monde dans l'ordre établi.

49. Dans le système de Ptolémée, qui fut exclusivement admis pendant tant de siècles, la terre était immobile au centre de l'univers, le ciel circulait autour d'elle, et chaque planète se mouvait sur la circonférence d'un cercle dont le centre était mobile sur celle d'un second cercle, celui de cette dernière sur celle d'un troisième, et ainsi de suite jusqu'au dernier, qui était concentrique à la terre. Cette suite de cercles, appelés *Épicycles*, avait été imaginée pour expliquer les variations que les planètes éprouvent dans leur marche, et à chaque nouvelle anomalie on était obligé d'augmenter la série de ces cercles mobiles.

50. Le mouvement de la terre et des planètes autour du soleil avait été enseigné par Pythagore. Aristarque, astronome de l'école d'Alexandrie, avait cherché à faire revivre l'opinion du philosophe grec; mais cette doctrine fut rejetée. Dans les temps modernes, Copernic, en reproduisant la doctrine de Pythagore et l'heureuse idée du philosophe Nicétas qui avait expliqué la rotation apparente du ciel par un mouvement de la terre en sens contraire, parvint à donner des mouvemens célestes une explication aussi simple que satisfaisante. Le soleil était immobile au centre du monde, les planètes circulaient autour de lui, et la terre, indépendamment de son mouvement autour du soleil, tournait sur elle-même. Le mouvement apparent du ciel était une illusion produite par celui de la terre en sens contraire; les apparences des planètes, le résultat de leur mouvement combiné avec celui de la terre; la précession des équinoxes, un mouvement de l'axe de la terre. Cet échafaudage de

cercles imaginés par Ptolémée, disparaissait, et tous les phénomènes célestes s'expliquaient avec une précision et une clarté admirables.

51. Galilée, par la découverte des satellites de Jupiter, par celle des phases de Vénus, démontra la vérité du système de Copernic, et les persécutions dont ce grand homme fut l'objet ne servirent qu'à lui donner un nouvel éclat.

Képler, presqu'en même temps, en comparant une multitude d'observations, découvrit les 3 lois suivantes :

1° Les planètes se meuvent dans des courbes planes, et leurs rayons vecteurs (1) décrivent des espaces proportionnels aux temps;

2° Les orbites des planètes sont des ellipses (2), dont le soleil occupe un des foyers;

3° Les carrés des temps des révolutions sont proportionnels aux cubes de leurs grands axes (3).

Non-seulement ces lois sont l'expression fidèle des observations dont Képler s'est servi, mais encore elles satisfont à toutes celles qu'on a faites depuis : toutes peuvent s'en déduire au moyen d'un petit nombre d'entr'elles, et la régularité qu'elles établissent dans les mouvemens des corps célestes, permet de déterminer d'avance, et pour une époque quelconque, l'état du système du monde.

Il restait encore à découvrir la cause des mouvemens des corps célestes : c'était à Newton que cette grande découverte était réservée.

Galilée avait découvert les lois de la pesanteur; Hu:ghens, celle du mouvement; Descartes avait changé la face des mathématiques, par la découverte de l'application de l'Algèbre à la Géométrie; Fermat avait posé les bases de la Géométrie de l'infini; Hoock venait d'apercevoir que les mouvemens des corps célestes étaient dus à une force de projection combinée avec une attraction du soleil.

---

(1) On appelle *rayon vecteur d'une planète*, une ligne qui passe par son centre et par celui du soleil.

(2) On appelle *ellipse*, une courbe plane ovale (*fig.* 19) : son plus grand diamètre A B est son axe : ses deux foyers sont deux points F et F', situés sur le grand axe, et dont la somme des distances M F et M F', à un point quelconque de la courbe, est égale au grand axe A B.

(3) On appelle *carré d'un nombre*, le produit de ce nombre multiplié par lui-même; et *cube d'un nombre*, le produit de ce nombre par son carré.

52. Newton, dans son admirable ouvrage des principes mathématiques de la philosophie de la nature, démontra :

1° Que, de la première loi de Képler, il résultait que la force qui maintenait ces planètes dans leurs orbites, était dirigée vers le centre du soleil ;

2° Que la première et la seconde loi de Képler donnaient pour conséquence nécessaire, que l'attraction solaire suivait la raison inverse du carré de la distance ;

3° Que la troisième loi indiquait que toutes les planètes, à l'unité de distance, étaient également attirées.

Newton posa alors cette grande loi de la nature : *Toutes les molécules de la matière s'attirent en raison directe de leur masse, et en raison inverse du carré de leur distance.*

En partant de cette loi, il reconnut que tous les phénomènes du mouvement des corps célestes, les mouvemens des planètes autour du soleil, leurs rotations sur elles-mêmes, les mouvemens des satellites, ceux des comètes, étaient uniquement produits par une impulsion initiale, combinée avec l'attraction solaire. Le calcul lui fit découvrir que les planètes auraient pu décrire des ellipses, des paraboles ou des hyperboles (1) ; que la nature de l'orbite dépendait de la vitesse et de la distance initiale au soleil, et qu'enfin les dimensions de la courbe et son excentricité étaient liées à la direction de l'impulsion initiale.

L'Astronomie n'est donc plus qu'un grand problème de mécanique embrassant à la fois l'état passé, présent et futur du système du monde, et pour la solution duquel l'analyse n'emprunte à l'expérience que quelques données indispensables.

(1) L'ellipse est une courbe fermée A B, qu'on obtient en coupant un cône (*fig.* 20) par un plan qui coupe toutes les arêtes : la parabole est une courbe indéfinie D C B, qu'on obtient en coupant par un plan parallèle à une arête ; enfin, l'hyperbole est formée de deux courbes symétriques G F H et G' F' H' ; c'est encore une section conique par un plan qui coupe en même temps les deux nappes du cône.



53. Depuis Newton, on est parvenu à déterminer, par le calcul, les nombreuses perturbations que les planètes éprouvent dans leur marche, par leur attraction réciproque. La connaissance de la cause de ces mouvemens a fait découvrir des anomalies séculaires que l'observation n'aurait pu indiquer que très-imparfaitement. Les inégalités du mouvement de la lune ont conduit à la découverte de l'aplatissement du sphéroïde terrestre; le perfectionnement de la théorie des mouvemens lunaires a des procédés simples et rigoureux pour déterminer les différens points de la surface du globe, opération si souvent indispensable à la géographie et à la navigation.

54. La gravitation ne se borne point aux espaces célestes, elle se retrouve à la surface de la terre pour y produire la pesanteur, et dans les actions les plus intimes des molécules pour produire presque tous les phénomèmes de la Physique moléculaire. Telle est la marche de la nature : simplicité dans les causes, fécondité inépuisable dans les résultats.

§ II.

De la Pesanteur.

55. *Définition de la pesanteur.* La plupart des corps qui existent sur la terre, lorsqu'ils sont abandonnés à eux-mêmes, se précipitent vers sa surface : la force qui produit ce mouvement a reçu le nom de *Pesanteur.* C'est la recherche des causes et des lois de la pesanteur qui va nous occuper.

A. *Phénomènes généraux et cause de la Pesanteur.*

56. *Tous les corps ne se précipitent pas vers la surface de la terre.* Nous avons dit que la plupart des corps, lorsqu'ils sont libres, se précipitent vers la surface de la terre; mais on en connaît qui restent suspendus à des hauteurs plus ou moins considérables, et il y en a même qui sont doués d'un mouvement ascensionnel. A quoi tient cette anomalie? Telle est la première question que nous allons essayer de résoudre.

57. *Atmosphère.* La terre est environnée de toutes parts d'un corps gazeux dont la pesanteur peut être reconnue par des expériences directes,

que nous indiquerons plus tard. On le désigne sous le nom d'*Air*, et sa masse sous celui d'*Atmosphère*. Examinons quelle peut être l'influence de l'air sur un corps pesant qui est plongé.

58. *Un corps plongé dans un fluide quelconque perd de son poids celui d'un égal volume du fluide.* Soit M N P Q (*fig.* 21) une masse fluide quelconque dont les molécules pesantes et parfaitement libres sont maintenues en équilibre ou par la résistance des parois du vase qui la renferme, ou de toute autre manière. Considérons une portion quelconque A B de cette masse : il est évident que, cette portion étant pesante, il faut, si elle reste suspendue, que le fluide environnant exerce sur elle une pression dirigée de bas en haut et égale à son poids. Or, si à cette portion du fluide on substitue un autre corps occupant le même espace, le fluide environnant ne cessera pas d'agir de la même manière; il le soutiendra comme il soutenait le fluide dont il tient la place; et, par conséquent, ce corps perdra de son poids celui du fluide dont il tient la place. Nous pouvons donc regarder comme un fait démontré qu'un corps plongé dans un fluide quelconque perd de son poids celui d'un égal volume de ce fluide.

On peut vérifier le fait que nous venons d'énoncer, au moyen d'un appareil fort simple. A et B (*fig.* 22) sont deux cylindres métalliques, suspendus l'un au-dessous de l'autre, à la place d'une coupe D de la balance D E G. Le cylindre A est fermé par sa partie inférieure seulement; le cylindre B est fermé de toutes parts. Le premier est construit de manière que le second peut y être introduit exactement; ainsi, la capacité intérieure du cylindre A est égale au volume extérieur du cylindre B. Les deux cylindres sont équilibrés par des poids placés dans la coupe F. L'appareil ainsi disposé, on fait plonger le cylindre inférieur dans un vase plein d'eau; l'équilibre cesse d'exister, et se trouve rétabli lorsqu'on a rempli d'eau le cylindre A. Le cylindre B a donc perdu, par son immersion, le poids du liquide qu'on a mis dans le cylindre A, c'est-à-dire, celui d'un égal volume d'eau.

59. *Tous les corps coercibles sont pesans.* Ainsi, lorsqu'un corps est plongé dans un fluide quelconque, il est poussé de haut en bas par son poids, et de bas en haut par celui du fluide dont il tient la place.

Il en résulte que, si le corps est plus pesant que le fluide déplacé, il tombera; s'il l'est également, il restera stationnaire; et enfin, s'il l'est moins, il s'élèvera dans l'atmosphère. C'est donc la pesanteur qui soutient les nuages, fait monter la fumée et les ballons, et produit tous les phénomènes analogues dans les différens liquides. Ainsi, nous pouvons regarder comme une loi générale que tous les corps coercibles, c'est-à-dire, tons ceux qui peuvent être renfermés dans des vases, sont pesans.

Nous avons reconnu, lorsqu'il a été question de la gravitation, que tous les corps jouissaient de la propriété de s'attirer; que c'était l'attraction du soleil sur les planètes qui produisait leur mouvement de rotation autour du soleil, et l'attraction des planètes sur leurs satellites qui était la cause de la rotation de ces derniers.

Il semble naturel, d'après cela, d'attribuer la pesanteur à l'attraction de la terre; mais cette analogie n'est point suffisante, et il faut s'assurer, par des expériences directes, si les corps s'attirent réellement à la surface de la terre.

60. *Les corps s'attirent à la surface de la terre.* Si les corps jouissent de la propriété de s'attirer, cette attraction sera en raison directe de leur masse. Or, la masse de la terre étant infiniment plus considérable que celle des corps terrestres que nous pouvons mettre en présence, la pesanteur de ces corps doit dissimuler leur attraction. Il faudrait donc, pour reconnaître dans les corps la propriété en question, les soustraire à l'influence de la pesanteur : Cavendisch y est parvenu, à l'aide de l'appareil que nous allons décrire.

Un fil métallique, extrêmement délié, est fixé par son extrémité supérieure A (*fig.* 23); l'autre extrémité B soutient par son milieu un levier horizontal C D, aux extrémités duquel sont placées deux boules métalliques égales C et D. Il est évident, d'après cette disposition, que la résultante des poids des deux masses C et D, passant par la direction du fil A B, sera détruite à chaque instant, et que, par conséquent, si le levier B C se meut horizontalement autour du point B, il ne sera nullement troublé par la pesanteur : cela posé, si on détourne le levier B C de sa position de repos, le fil A B se tordra et tendra à revenir à sa

position initiale avec une force toujours croissante, qui, finissant par vaincre l'impulsion initiale, ramènera le levier à la position de repos avec une vitesse acquise qui lui fera dépasser cette position; la force provenant de la torsion en sens contraire, la ramènera de nouveau à la position de repos, autour de laquelle il fera ainsi des oscillations plus ou moins nombreuses avant d'y rester en équilibre. Coulomb, qui a imaginé le premier cet appareil, mais qui l'a seulement employé à la mesure des forces électriques et magnétiques, a reconnu, après de nombreuses expériences, que la force provenant de la torsion était proportionnelle à l'angle décrit par le levier, depuis la position de repos. Cavendisch plaça devant les extrémités C et D, deux grosses sphères de plomb E et F parfaitement égales, et de manière que la ligne qui joignait leur centre passât exactement par le point B, afin que l'action de ces deux masses n'altérât pas la position verticale du fil de suspension. Cavendisch observa qu'aussitôt que les masses étaient mises en présence des boules C et D, ces dernières s'approchaient des sphères de plomb, et que le levier C D faisait des oscillations autour d'une nouvelle ligne de repos G H, qu'il finissait par atteindre, après un temps assez considérable. Il est évident que, dans cette nouvelle position d'équilibre, la force de torsion est égale à l'attraction des deux masses E et F. La nouvelle position d'équilibre était déterminée au moyen d'un cercle M N; en faisant varier la distance initiale des deux masses E et F, de manière que, dans la position d'équilibre, l'angle de torsion fût quatre fois plus petit, on reconnut que la distance des masses était double, et, en général, que la force de torsion, et, par conséquent, l'attraction à laquelle elle fait équilibre, varient en raison inverse du carré de la distance des centres des sphères.

B. *Lois de la Pesanteur.*

61. Le fait de l'attraction des corps terrestres étant bien reconnu, il est facile d'en déduire tous les phénomènes généraux de la pesanteur. Mais avant, il faut connaître la forme de la terre, puisque les lois de l'attraction terrestre doivent nécessairement dépendre de cette forme.

62. *Forme de la terre.* La terre est un corps arrondi et isolé dans l'espace ; c'est ce que démontrent les voyages autour du monde, et surtout les éclipses de lune.

Un des vaisseaux partis de Séville en 1519, sous la conduite de Magellan, revint le 8 septembre au point du départ, après s'être constamment dirigé vers l'ouest. Ce fait, constaté depuis par un grand nombre d'autres navigateurs, démontre la rondeur de la terre de l'orient à l'occident. La disposition des continens, et la rigueur des climats qui avoisinent les pôles, n'ont point permis jusqu'ici de faire le tour de la terre dans la direction du nord au sud, et de reconnaître directement, par les voyages, la rondeur de la terre, dans tous les sens. Mais les phénomènes que présente le ciel lorsqu'on avance vers le nord ou vers le sud, démontrent, avec la dernière évidence, que la terre est aussi arrondie dans cette direction.

On sait que le ciel paraît tourner autour d'une ligne qu'on nomme axe du monde, et qui va percer le ciel en deux points désignés sous le nom de Pôles, dont l'un, visible dans nos climats, est occupé par l'étoile pôlaire. Cette étoile paraît constamment immobile, tandis que les autres décrivent des cercles d'autant plus grands qu'elles sont plus éloignées des pôles. Dans nos climats, l'étoile pôlaire est élevée au-dessus de l'horizon, les étoiles voisines sont toujours visibles parce qu'elles décrivent des cercles entièrement situés dans la partie visible du ciel. Mais il en est qui sont assez éloignées de l'étoile pôlaire, pour qu'une partie de leur révolution s'effectue au-dessous de l'horizon, et qui, par conséquent, se lèvent et se couchent.

Or, si, en partant d'un point quelconque de l'équateur, on se dirige vers le nord, on voit les étoiles situées dans cette partie du ciel s'élever graduellement au-dessus de l'horizon, tandis que celles situées vers le sud s'abaissent et disparaissent successivement. Les mêmes phénomènes ont lieu lorsqu'on se dirige vers le sud.

Ainsi, lorsqu'on part d'un point quelconque de la terre, et qu'on se dirige vers le nord ou vers le sud, l'horizon s'abaisse devant soi : la terre est donc aussi arrondie dans le sens de la direction des pôles.

Mais, de tous les phénomènes célestes, ce sont les éclipses de lune qui mettent le mieux en évidence la forme de la terre. En effet, la terre, éclairée par le soleil, doit projeter derrière elle une ombre dont la forme dépend de celle de la terre. Si la terre est sphérique, l'ombre sera un cône à base circulaire, et la lune, toujours dans son plein lorsqu'elle pénètre cette ombre, devra paraître échancrée par une ligne circulaire : c'est en effet ce qu'on a observé dans toutes les positions de la terre.

Cependant, la terre n'est point exactement sphérique; non-seulement certaines perturbations des mouvemens de la lune, mais encore des mesures directes, ont fait reconnaître que la terre était aplatie par ses pôles, c'est-à-dire, aux points où elle est traversée par l'axe de la rotation apparente du monde, ou par la ligne autour de laquelle elle effectue sa rotation diurne.

L'aplatissement est de $\frac{1}{305}$ du grand axe, c'est-à-dire, que, si on divise le plus grand diamètre en 305 parties égales, le plus petit diamètre contiendra 304 de ces parties.

Le plus grand diamètre de la terre est de 12,753,212 mètres, et le plus petit, de 12,712,430 mètres; le diamètre moyen, de 12,732,821; la circonférence moyenne, de 40,217,497, environ 10,000 lieues de 2000 toises.

63. *Attraction d'une masse sphérique sur un point extérieur.* On démontre en mécanique que, si tous les points d'une masse sphérique homogène, ou composée de couches concentriques homogènes, attirent un point extérieur en raison inverse du carré de la distance, cette masse agit comme si elle était concentrée à son centre; de sorte que, si le point est libre d'obéir à cette attraction, il se mouvra suivant une droite dont le prolongement irait passer par le centre de la sphère.

64. *On peut considérer la terre comme sphérique.* La terre, quoique d'une forme arrondie, n'est point exactement sphérique : sa surface est couverte de nombreuses inégalités; elle est aplatie par les pôles, et ses deux hémisphères, séparés par l'équateur, ne sont point égaux. Elle n'est point homogène, comme nous le verrons plus tard; et il est même

probable qu'elle n'est pas composée de couches homogènes concentriques. Cependant, comme toutes ces irrégularités n'ont, en général, qu'une très-faible influence dans les phénomènes dont il est question, nous pourrons appliquer à la terre le résultat analytique que nous venons de poser.

Ainsi, la pesanteur des corps est le résultat de l'action de toutes les molécules qui composent le globe terrestre; la terre agit comme si sa masse était réunie à son centre, et, par conséquent, la direction de la chute des corps étant prolongée doit passer par le centre de la terre.

65. *Centre de gravité.* Le point d'application de la résultante de toutes les forces qui attirent les points d'un corps vers le centre de la terre, porte le nom de Centre de Gravité. Si le corps est solide et s'il est assez petit, ou assez éloigné du centre de la terre pour que les différences des distances de ses molécules au centre de la terre puissent être négligées, ainsi que les angles formés par leurs verticales, c'est-à-dire, si on peut regarder à un même instant la pesanteur de toutes les molécules comme étant égale et parallèle, le centre de gravité deviendra un point fixe, quel que soit le mouvement et la position du corps, et la résultante sera égale à la somme des pesanteurs de toutes les molécules; car alors le centre de gravité devient le centre des forces parallèles (33). Dans ce cas, qui est celui de tous les corps qui sont à la surface de la terre, on peut toujours remplacer la pesanteur de toutes les molécules par une seule force appliquée au centre de gravité. On conçoit combien tous les problèmes relatifs à la pesanteur se trouvent simplifiés, et combien il est important d'avoir des procédés au moyen desquels on puisse, dans chaque cas particulier, déterminer la position du centre de gravité.

66. *Détermination du centre de gravité d'un corps homogène.* Lorsqu'un corps est homogène, c'est-à-dire, lorsque la matière y est uniformément distribuée, il est évident que, si l'on coupe le corps en deux parties égales, par un plan, le centre de gravité devra se trouver dans ce plan, car il n'y a pas de raison pour qu'il soit d'un côté plutôt que de l'autre. Si on le coupe encore, par un nouveau plan, en deux parties égales, le centre de gravité devra encore se trouver dans ce plan, et sera, par conséquent, sur la ligne d'intersection des deux plans. Enfin, si l'on

fait encore la même opération avec un troisième plan, le centre de gravité sera au point d'intersection des trois plans. Ainsi, le centre de gravité coïncide avec le centre de figure : le centre de gravité d'une ligne est à son milieu ; celui d'un cercle ou d'une sphère, à son centre ; celui d'un parallélogramme, au point d'intersection des deux diagonales, etc.

67. *Détermination du centre de gravité d'un corps hétérogène.* Si le corps n'est point homogène, le centre de gravité ne coïncide plus avec le centre de figure. Dans ce cas on peut parvenir à le déterminer par le moyen suivant. Soit M N (*fig.* 24) un corps quelconque : si on le suspend par un fil A B, le corps restera en équilibre lorsque la verticale du centre de gravité se trouvera dans la direction du fil de suspension : car la force qui est appliquée au centre de gravité ne peut être détruite par la résistante d'un point, qu'autant que celui-ci se trouve sur sa direction. Ainsi le prolongement de la ligne A B doit passer par le centre de gravité. En répétant cette opération sur un autre point B, on aura une autre ligne qui devra contenir le centre de gravité, lequel sera alors déterminé par l'intersection de ces deux lignes.

68. *Verticale.* La direction de la pesanteur se nomme Verticale ; elle est différente pour chaque lieu. C'est la direction de la verticale qui détermine le haut et le bas de chaque lieu : ces expressions n'ont donc rien d'absolu, et changent comme la direction de la pesanteur, lorsqu'on passe d'un lieu dans un autre.

69. *Variation de l'intensité de la pesanteur au-dessus de la surface de la terre.* La pesanteur est, comme nous l'avons déjà dit, une force qui agit continuellement sur les corps soumis à son influence ; ses actions successives s'ajoutent continuellement, et les vitesses sont toujours croissantes, si le corps n'est sollicité par aucune autre force. Lorsque le corps tombe vers la surface de la terre, les actions de la pesanteur croissent en raison inverse du carré de la distance, et les vitesses qui en résultent, de même que les espaces parcourus, se déterminent comme si la terre n'agissait que sur une seule molécule. (71)

70. *Variation de l'intensité de la Pesanteur dans l'intérieur de la terre.* Mais lorsqu'un corps pénètre dans l'intérieur de la terre, la pesanteur

suit une loi bien différente. En effet, si nous considérons une molécule *m* (*fig.* 25) dans l'intérieur de la terre, toute la portion de matière située au-dessus d'elle l'attirera vers la surface, tandis que la partie inférieure de la terre l'attirera en sens contraire ; de sorte qu'elle ne sera réellement attirée vers le centre de la terre que par la différence de ces deux forces. Cette différence allant en diminuant à mesure que la molécule se rapproche du centre de la terre où elle devient nulle, il en résulte que la pesanteur va en diminuant continuellement depuis la surface de la terre où elle est à son *maximum* jusqu'au centre où elle est nulle. Cette variation a lieu en raison directe de la distance au centre de la terre.

On peut démontrer cette proposition d'une manière très-simple. En effet, soit A B C D (*fig.* 26) une enveloppe sphérique infiniment mince, et *m* un point intérieur attiré par tous les points de l'enveloppe en raison inverse du carré de la distance. Je dis que le point *m*, quelle que soit sa position, restera en équilibre dans cette enveloppe. En effet, concevons, par le point *m*, un double cône infiniment délié. Les deux cercles *a b* et *c d*, interceptés sur la surface sphérique, attireront le point *m* suivant les directions opposées *m p* et *m q*, qui passent par leurs centres : et ces attractions seront proportionnelles aux surfaces *a b* et *c d*, et en raison inverse des carrés des distances *m p* et *m q*; de sorte que, si nous désignons par *f* l'unité d'attraction, c'est-à-dire, celle qui serait produite par l'unité de surface agissant sur une molécule à l'unité de distance, l'attraction de la surface *a b* sera $\frac{f \times \text{surf. } ab}{mp^2}$, et celle de la surface *c d* sera $\frac{f \times \text{surf. } cd}{mq^2}$. Or, les cônes *a b m* et *c d m* sont semblables, et leurs bases sont entre elles comme les carrés des hauteurs ou des côtés, ou de leurs axes. Nous aurons la proportion :

Surf. ab : surf. cd :: $mp^2 : mq^2$ ou bien $\frac{\text{surf. } ab}{mp^2} = \frac{\text{surf. } cd}{mq^2}$. Et, en multipliant par *f* les deux membres de cette équation, $\frac{f \text{ surf. } ab}{mp^2} = \frac{f \text{ surf. } cd}{mq^2}$.

Ainsi, les 2 attractions qui agissent suivant *p q* sont égales et opposées; et comme il en serait de même de celles qui agissent suivant toute autre direction, il en résulte que la molécule *m* est également attirée dans tous les sens possibles, et que, par conséquent, elle restera en équilibre.

Considérons maintenant la molécule *m* dans une sphère matérielle, et, par le point *m*, menons une sphère concentrique à la première (*fig.* 27). Toute la masse de matière comprise entre les deux sphères pourra être regardée comme une série d'enveloppes extrêmement minces : la molécule *m* étant en équilibre dans chacune d'elles,

d'après ce que nous venons de démontrer, leur réunion ne pourra produire aucun effet sur le point *m*, qui ne sera plus attiré que par la sphère intérieure qui passe par ce point. Cette sphère agissant comme si la masse était réunie à son centre, l'attraction sera égale à la masse de cette sphère divisée par le carré du rayon *o m*. Si le corps est homogène, la masse est proportionnelle au volume, et, par conséquent, l'attraction sera proportionnelle à $\frac{4\pi R^3}{3R^2}$ ou à $\frac{4\pi R}{3}$, c'est-à-dire, proportionnelle à la distance de la molécule au point *o*.

71. *Tous les corps sont également pesans.* Lorsqu'un corps est soumis à l'action de la pesanteur, nous avons vu que, dans le cas où se trouvent tous les corps qui sont à la surface de la terre, la pesanteur des molécules pouvait être remplacée par une force unique appliquée au centre de gravité, et que l'intensité de cette résultante était égale à la somme des forces qui agissaient sur les molécules. Il résulte de là que le poids d'un corps est proportionnel à sa masse. Mais comme d'un autre côté les vitesses sont en raison inverse des masses, il en résulte que la vitesse de la chute d'un corps pesant est indépendante de sa masse, et se trouve égale à celle de la chute d'une molécule.

Tous les corps sont-ils également pesans? Telle est la nouvelle question qui se présente. D'après ce que nous avons déjà dit, il est évident que dans l'air il n'en est pas ainsi, puisque certains corps s'élèvent au lieu de tomber, que d'autres restent stationnaires, et que ceux qui tombent doivent éprouver dans leur chute un retard occasionné, non-seulement par la perte de poids provenant de leur immersion dans l'air, mais encore par la résistance que l'air oppose à ce déplacement, résistance qui dépend à la fois du volume et de la forme du corps.

Mais si les corps étaient soustraits à cette cause perturbatrice, s'ils étaient dans le vide, tomberaient-ils de la même hauteur dans le même temps? On peut facilement reconnaître, par une expérience directe, si les corps jouissent réellement de cette propriété. L'appareil dont on se sert pour cet objet est composé (*fig.* 28) d'un grand cylindre de verre E, garni d'une virole en cuivre P et d'un robinet M : la partie supérieure est terminée par une plaque de cuivre E F qui s'y applique exactement au moyen de plusieurs cuirs gras. A la partie inférieure de cette plaque

sont deux autres plaques en cuivre H A et I B : la dernière porte à charnière la soupape A B, et la première la retient par un petit crochet. Au centre de la plaque E F est placée une boîte C, garnie intérieurement de lames de cuir, à travers lesquelles passe une tige D G, à la partie inférieure de laquelle se trouve une plaque G destinée à écarter les plaques H A et I B, et, par conséquent, à faire tomber la soupape lorsqu'on tire la tige D G. Pour faire usage de cet appareil, on commence par placer sur la soupape A B des corps qui tombent dans l'air avec des vitesses très-inégales, par exemple, du plomb, du duvet, des feuilles d'or dont on se sert pour dorer le bois. On ferme le cylindre au moyen du plateau E F; puis, au moyen d'une machine que nous décrirons bientôt, on enlève l'air renfermé dans le cylindre; après quoi, en soulevant la tige D G, on fait partir en même temps les corps qui avaient été déposés sur la soupape.

En faisant cette expérience avec beaucoup de soin, on n'a jamais aperçu la plus petite différence dans la durée de la chute des corps, quels que soient d'ailleurs leur nature et leur volume.

Cependant il est impossible de déduire de cette expérience que les corps tombent de la même hauteur dans le même temps; car, dans cette expérience, les corps ne tombent jamais que d'une très-petite hauteur et dans un temps extrêmement petit; par conséquent, si la durée de la chute des corps différait de peu, nous ne pourrions pas nous en apercevoir. Mais il existe un autre appareil qui permettrait d'apprécier les plus petites différences, s'il en existait réellement. Cet appareil est le Pendule.

72. *Pendule.* Le pendule (*fig.* 29) est composé d'une tige solide, librement suspendue par une de ses extrémités, et portant à l'autre un corps solide de forme lenticulaire. Lorsque cet appareil a été détourné de la position d'équilibre, il tend à y revenir; mais, n'atteignant jamais cette position qu'avec une vitesse acquise, il la dépasse à chaque fois, et fait autour d'elle des oscillations, dont les amplitudes, toujours décroissantes, finissent par s'anéantir, après un temps plus ou moins considérable.

Pour analyser avec facilité les phénomènes du mouvement des pendules, on ne considère en mécanique qu'un pendule idéal, qu'on désigne sous le nom de Pendule simple ; il est composé d'une ligne rigide et inextensible, fixée par une de ses extrémités, et portant à l'autre un point matériel pesant. Lorsqu'on connaît la forme et la densité de toutes les parties qui composent un pendule ordinaire, la mécanique donne des règles pour trouver la longueur du pendule simple correspondant, c'est-à-dire, de celui qui ferait des oscillations dans le même temps.

Soit O M (*fig.* 30) un pendule simple en repos, O le centre de rotation, M le point matériel pesant. Supposons qu'après avoir été transporté en O M', on l'abandonne à lui-même : la pesanteur, agissant suivant M'P, pourra se décomposer en deux autres forces, l'une M' Q agissant dans la direction de la ligne de suspension, sera détruite par la résistance de cette ligne ; l'autre M' R dirigée suivant la tangente au cercle décrit par l'extrémité du pendule, tendra à ramener le pendule dans sa position verticale. Les intensités de ces deux forces se détermineront en prenant sur la direction de la pesanteur une ligne M' P pour représenter cette force, et en construisant le parallélogramme M' Q P n.

A chaque nouvelle position du point matériel, une nouvelle force tangencielle s'ajoutera avec une partie de la première, en vertu de l'inertie, de sorte que le pendule descendra à la position de repos O M avec une vitesse accélérée. La vitesse acquise pendant la chute du point M' au point M lui fera dépasser ce point ; mais à mesure qu'il s'élèvera de l'autre côté de la ligne de repos O M, la pesanteur se décomposera comme précédemment, imprimera au point matériel des forces qui, tendant à le ramener à la position verticale O M, détruiront à chaque instant une portion de la vitesse acquise et finiront par l'anéantir ; le pendule descendra de nouveau, pour remonter ensuite et pour continuer indéfiniment ses oscillations, si les frottemens et la résistance de l'air, diminuant continuellement l'amplitude des oscillations, ne finissaient par les anéantir.

On démontre en mécanique que les vitesses en montant et en descendant sont égales, aux mêmes distances du point M ; que, dans le cas où les excursions du pendule de part et d'autre de la verticule sont très-petites, leur durée est sensiblement indépendante de leur étendue ; et qu'enfin, il existe entre la longueur du pendule, la durée des oscillations et l'intensité de la pesanteur qui sollicite le point M, une relation nécessaire, telle que, deux de ces choses étant données, on peut en déduire la troisième.

En désignant par a la longueur du pendule, par g l'intensité de la pesanteur, par T la durée d'une oscillation, on a

$$T = \pi \sqrt{\frac{a}{g}}$$

Pour atteindre, autant que possible, à la simplicité du cas que nous venons de considérer, construisons (*fig.* 31) un pendule avec un fil métallique extrêmement délié, et fixons à son extrémité une sphère métallique dont la masse soit très-considérable relativement à celle du fil de suspension : il oscillera comme un pendule simple dont la longueur serait sensiblement égale à la distance du centre de gravité de la sphère, au point O, et, quoique son mouvement ait lieu dans l'air, ses oscillations seront isochrones, c'est-à-dire d'égale durée, si elles sont très-petites ; car la résistance de l'air augmente la durée de la demi-oscillation descendante, et abrège celle de la demi-oscillation ascendante à peu près de la même quantité ; de sorte que leur somme reste constante, quoique l'amplitude des oscillations aille toujours en diminuant.

Si maintenant on observe le nombre des oscillations que fait ce pendule dans un temps déterminé, dans une heure, par exemple, et qu'on répète cette observation, en remplaçant la sphère métallique par d'autres de différentes masses et de différentes substances, mais de manière que le centre soit toujours à la même distance du point O, on trouvera que le nombre des oscillations est toujours le même dans le même temps, qu'elles sont d'égale durée, et que, par conséquent, l'intensité de la pesanteur exercée sur les différentes substances dont on a formé la sphère qui termine le pendule, est parfaitement égale pour tous ; et

enfin, que tous les corps sur lesquels on a opéré, tomberaient de la même hauteur dans le même temps.

73. *Les masses des corps sont proportionnelles à leurs poids.* Il résulte encore de là une conséquence très-importante, c'est que le poids d'un corps étant égal à la somme des poids de toutes les molécules, et toutes les molécules matérielles étant également pesantes, les masses des corps sont proportionnelles à leurs poids.

C. *Lois de la chute des Corps à une petite distance de la surface de la terre.*

1° *Chute d'un Corps libre.*

Lorsqu'on veut avoir égard aux variations de la pesanteur en raison des distances, les vitesses et les espaces parcourus suivent par rapport au temps des lois très-compliquées ; mais dans le cas particulier d'un corps qui tombe vers la surface de la terre d'une petite hauteur, le prolème se simplifie, et le rapport des vitesses, des espaces parcourus et des temps deviennent extrêmement simples.

74. *Les vitesses sont proportionnelles aux temps.* Lorsqu'un corps tombe d'une petite hauteur, les variations de distance au centre de la terre, pendant toute la durée du mouvement, étant extrêmement petites, relativement au rayon de la terre, les variations d'attraction qui en résultent sont de si peu d'importance qu'elles deviennent inappréciables et qu'elles peuvent être négligées. On peut donc alors considérer la pesanteur comme une force accélératrice, dont les actions successives sont égales entre elles.

La première conséquence qui résulte de là, c'est que les vitesses sont proportionnelles aux temps écoulés depuis l'origine du mouvement ; car, en vertu de l'inertie de la matière, les petites forces imprimées successivement s'ajoutent, et, comme elles sont égales entre elles, la force

qui sollicite le corps à chaque instant croît proportionnellement aux temps, et, par conséquent (14), la vitesse augmente dans le même rapport.

75. *Les espaces parcourus sont comme les carrés des temps employés à les parcourir.* En partant de cette première loi, on démontre en mécanique que les espaces parcourus sont comme les carrés des temps employés à les parcourir ; de sorte que les espaces parcourus pendant 1, 2, 3, 4, 5.... secondes, sont entre eux comme la suite des carrés des nombres naturels 1, 4, 9, 16, 25, etc.

Pour démontrer cette loi, représentons par A B (*fig.* 32) le temps de la chute d'un corps, par B C la vitesse à la fin de la chute : si nous joignons le point A avec le point C, nous obtiendrons la vitesse à la fin d'un temps quelconque A D, en menant, par le point D, la droite D E parallèle à B C ; car, dans la figure, les lignes A B et A D sont dans le même rapport que B C et D E. Or, puisque les temps sont dans le même rapport que les vitesses, et que les lignes A B et A D représentent les temps, et la ligne B C la vitesse à la fin du premier temps, il faut nécessairement que la ligne D E représente la vitesse à la fin du temps A D.

Concevons maintenant que la pesanteur, au lieu d'agir d'une manière continue, n'agisse que brusquement et à des intervalles appréciables, soient *a*, *b*, *c*, *d*.... les instans successifs de ces actions, les vitesses successives seront représentées par les lignes *a m*, *b p*, *c r*, etc. Pendant le temps *a b* le corps se mouvra uniformément avec la vitesse initiale *a m* ; pendant le temps *b c*, il se mouvra uniformément avec la vitesse *b p*. Mais lorsqu'un corps se meut uniformément, l'espace parcouru est égal à la vitesse multipliée par le temps. Les espaces parcourus pendant les temps *a b*, *b c*, *c d*, etc., seront donc représentés par $a\,m \times a\,b$, $b\,p \times b\,c$, $c\,n \times o\,d$, etc., c'est-à-dire, seront représentés par les rectangles *a b m m'*, *b c p p'*, *c d r r'*, etc. ; et la somme de tous ces rectangles représentera l'espace parcouru pendant le temps A B. Or, à mesure que nous supposerons plus voisines les actions de la pesanteur, l'hypothèse que nous avons formée se rapprochera de la réalité, et la somme des rectangles qui représentent l'espace parcouru pendant le temps A B, différera toujours moins de la surface du triangle A B C ; de sorte que, quand nous regarderons les actions de la pesanteur comme consécutives, l'espace parcouru pendant le temps A B sera rigoureusement représenté par la surface du triangle A B C ; de même l'espace parcouru pendant le temps A D sera représenté par le triangle A D E. Or, comme ces deux triangles sont semblables, leurs surfaces seront comme les carrés des côtés homologues, et, par conséquent, on en déduit que les espaces parcourus pendant les temps A B et A D sont entre eux comme les carrés de ces temps.

Il résulte encore de cette loi, que les espaces parcourus pendant des instans égaux et successifs, sont entre eux comme la série des nombres naturels 1, 3, 5, 7, 9, etc.; car les espaces parcourus pendant la première, les deux premières et secondes, étant représentés par la suite des carrés 1, 4, 9, 16, 25, etc., les espaces parcourus pendant les secondes successives, seront les différences entre un de ces nombres et le précédent : par exemple, l'espace parcouru pendant la deuxième seconde sera 3, différence qui existe entre 4 et 1, l'espace parcouru pendant la troisième sera 5, différence entre 16 et 9, et ainsi de suite.

76. *Machine d'Athood.* Ces lois sont trop importantes, et ont des conséquences trop nombreuses, pour qu'on n'essaie pas de les vérifier. Mais la chute des corps est trop rapide, ils parcourent, dans un temps très-court, un trop grand espace, pour qu'on puisse directement faire cette vérification ; car, indépendamment de la difficulté de faire ces expériences, la plus petite erreur sur l'estimation des temps en produirait une très-grande sur celle de l'espace parcouru ; ce qui ne permettrait pas d'ajouter une grande confiance aux résultats de l'expérience.

Mais puisque c'est la trop grande intensité de la pesanteur qui s'oppose à la vérification des lois que nous avons trouvées par le calcul, s'il était possible de diminuer cette intensité, nous pourrions atteindre au but cherché. Il existe plusieurs moyens de diminuer l'intensité de la pesanteur, mais nous nous bornerons à donner celui qui a été employé par Athood, et nous décrirons avec soin la machine qu'il a employée à la vérification des lois en question (*fig.* 33).

Soit A B une poulie mobile ; P et P', deux poids égaux, attachés aux extrémités d'un fil très-délié enroulé sur la poulie : il est évident que les poids P et P' se feront mutuellement équilibre. Si maintenant on place, au-dessus de P', un nouveau poids p, l'équilibre sera rompu, le poids additionnel mettra tout en mouvement. Lorsque le poids p tombe tout seul et librement, il ne fait mouvoir que sa masse, et quand il tombe appliqué sur le poids P', il fait mouvoir à la fois les

masses P et P' et la sienne propre. Mais, comme en vertu de l'inertie les vitesses qu'une même force imprime à différentes masses, sont en raison inverse de ces masses, il en résulte que le poids *p* tombera, lorsqu'il fera partie de l'appareil, avec une vitesse qui sera à celle qu'il avait lorsqu'il tombait librement, comme la masse *p* est à la masse P plus, P' plus *p* ; ainsi, en supposant que P et P' sont des 1000 gr., et *p* de 1 gr., la vitesse sera 2001 fois plus petite.

La machine d'Athood (*fig.* 34) est composée d'une poulie A B très-légère, dont chaque extrémité de l'axe est mobile sur les circonférences; de 4 roulettes *m*, *m'*, afin de diminuer le frottement ; une soupape *c*, qui se fixe contre le crochet à ressort D, retient le poids P' et permet de la faire partir à un instant déterminé : la tige graduée porte deux boîtes mobiles, qui peuvent se fixer à différentes hauteurs ; la première porte un prolongement *x y* formé d'une plaque percée d'un trou, à travers lequel peut passer le poids P' ; l'autre est formé d'une plaque circulaire plane, le poids additionnel *p* a la forme indiquée dans la figure *p* ; à côté se trouve un pendule qui sonne la seconde.

Pour vérifier la loi des espaces parcourus par rapport aux temps employés, on place le poids P' avec son poids additionnel *p* sur la soupape *c* rendue horizontale et retenue à cette position par le crochet D. On fait partir le corps au commencement d'un battement du pendule, et on place par tâtonnement la boîte M' de manière que le choc du corps sur cette plaque coïncide avec le battement suivant. La distance de la plaque au point D est alors l'espace parcouru dans une seconde. Si, après avoir fait cette première épreuve, on remonte le corps P' sur la soupape, et si on descend la plaque M' de manière que sa distance au point D soit 4 fois plus grande, on observe que le poids P portant au commencement d'un battement, son choc sur la plaque M' coïncide avec le 3e battement ; et, si on met la boîte M' à une distance 9 fois plus grande que la première, ce choc se manifestera au 4e battement ; d'où il résulte la loi énoncée, que les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.

Pour vérifier si les vitesses sont proportionnelles aux temps, il faudrait, à différentes époques de la chute, arrêter l'action de la pesanteur ; le corps se mouvrait uniformément avec la vitesse acquise, et l'espace qu'il parcourrait dans l'unité des temps, serait la mesure de la vitesse, qu'on pourrait alors comparer aux temps employés pour l'acquérir. La machine d'Athood offre un moyen fort simple pour remplir cet objet. En effet, dans les expériences précédentes, tout se passe comme si la pesanteur n'agissait que sur le poids additionnel, puisque les poids des deux corps P et P' se font équilibre ; donc, si, à une époque quelconque de la chute, on enlève ces poids, la chute n'aura plus lieu qu'avec la vitesse acquise. Pour cela on se sert d'un corps *p'* de même poids que *p*, mais très-allongé, de manière à ce que le corps P', en passant à travers l'anneau de la plaque M, P' y laisse ce poids moteur. On place la plaque M successivement aux distances parcourues dans une seconde, deux secondes, etc., et on trouve que les vitesses acquises sont proportionnelles aux temps écoulés depuis l'origine du mouvement, et que l'espace parcouru avec la vitesse acquise pendant un temps égal à celui qui s'est écoulé depuis l'origine du mouvement, est double de l'espace parcouru pour acquérir cette vitesse.

2° *Chute d'un Corps sollicité par une force initiale constante.*

Si la force initiale est dirigée dans le sens de la pesanteur, les effets de ces deux forces s'ajouteront à chaque instant ; la vitesse sera égale à la vitesse initiale, plus, celle résultant de l'action de la pesanteur ; et l'espace parcouru sera égal à la somme des espaces que le corps aurait parcouru s'il eût été successivement soumis à l'action de ces deux forces.

Si la force constante a imprimé un mouvement en sens contraire de la pesanteur, les actions successives de cette dernière diminueront continuellement la vitesse primitive, finiront par l'anéantir, et le corps tombera alors comme s'il partait de repos. Dans ce cas les vitesses du

mobile en montant et en descendant sont les mêmes à des hauteurs égales, la vitesse à la fin de la chute est égale à l'impulsion initiale, et par conséquent la durée de sa chute est égale à celle du mouvement ascensionnel.

77. Ainsi, pour élever un projectile à une hauteur quelconque, il faut lui imprimer une vitesse égale à celle que la pesanteur lui ferait acquérir s'il tombait de cette hauteur.

Pour démontrer ce qui précède, représentons par *a* la vitesse initiale; par 1, celle qui résulte d'une impulsion de la pesanteur; et supposons, pour fixer les idées, qu'il faille 30 impulsions de la pesanteur pour détruire la vitesse de projection, *a* sera égal à 30, et les vitesses, en montant, seront successivement 30, 29..... 3, 2, 1, 0; et en descendant, elles seront successivement 0, 1, 2, 3..... 28, 29, 30.

78. Lorsque l'impulsion initiale est inclinée à l'horizon, le projectile s'élève en décrivant une courbe, et redescend ensuite en décrivant une courbe semblable. Les vitesses sont encore égales aux mêmes hauteurs en montant et en descendant. La courbe décrite est une parabole; la mécanique donne des moyens pour en calculer tous les élémens.

3.° *Chute d'un Corps sur une ligne droite et sur une ligne courbe.*

79. Lorsqu'un corps M (*fig.* 35) est obligé de glisser sur une ligne A C, inclinée à l'horizon, sa pesanteur peut se décomposer en deux forces *o p* et *o q*: la première, perpendiculaire à la ligne A C, est détruite par sa résistance; l'autre *o q*, parallèle à cette ligne, produit le mouvement du corps. La pression sur la ligne A C est constante; car, à chaque instant elle est détruite, et le mouvement parallèle à cette ligne est accéléré comme celui de la chute verticale; seulement l'intensité de la force accélératrice sera d'autant plus petite que la ligne A C se rapprochera davantage de l'horizon.

80. Il est facile de démontrer que la pesanteur, l'intensité de la force accélératrice qui agit parallèlement à A C, et enfin la pression, sont entre elles comme les lignes A C, A B, B C; car, dans le triangle *o s p*, *o s* représente la pesanteur, *p s* la force qui agit parallèlement à A C, et enfin *o p* la pression. Or, ce triangle est semblable au triangle A B C: on a donc

$$os : sp : op :: AC : AB : BC.$$

81. Lorsqu'un corps tombe suivant une courbe quelconque A B (*fig.* 36), la vitesse avec laquelle il arrive au point B est égale à celle qu'il aurait acquise en tombant librement du point A, suivant la verticale A C; et, en général, lorsqu'un corps tombe du point A, en suivant une courbe quelconque, sa vitesse est toujours la même à des distances verticales égales de l'origine du mouvement.

82. La courbe de la plus vite descente, c'est-à-dire, celle qu'un corps devrait parcourir pour descendre d'un point à un autre dans le temps le plus court, porte le nom de Cycloïde. La Cycloïde est une courbe décrite par un point quelconque d'un cercle qui roule sur une ligne droite; dans la fig. 37, A B est le cercle mobile, A P la droite directrice, A le point générateur; lorsque le cercle A B a parcouru une partie A F de la ligne A P, égale à la moitié de sa circonférence, le point A se trouve au point le plus élevé; après une révolution complète du cercle, il se trouve de nouveau sur la ligne A P, et ainsi de suite; la Cycloïde est alors composée d'un nombre infini de branches semblables à A C D. On démontre en mécanique que, pour qu'un corps descende du point A au point B (*fig.* 38) dans le temps le plus court possible, il faut qu'il parcoure une cycloïde renversée à base horizontale.

83. Cette même courbe jouit encore d'une autre propriété bien remarquable, c'est que la durée de la chute d'un corps qui la parcourt est indépendante de la distance du point de départ au point le plus bas. Ainsi des corps partant en même temps des points A, A', A'' (*fig.* 38) arriveront en même temps au point B.

84. Cette propriété fournit un moyen simple de rendre parfaitement isochrones, c'est-à-dire, d'égale durée, les oscillations d'un pendule; car il suffit de faire décrire au centre d'oscillation une cycloïde: on y parvient en employant pour le pendule une ligne flexible, et en plaçant de chaque coté du point O (*fig.* 39) deux plaques terminées par des cycloïdes égales, dont l'axe est horizontal. Le pendule, dans ses écarts successifs de chaque côté de la verticale O C, s'enroule en partie sur ces cycloïdes, et chacun des points qui sont situés au delà, au lieu de décrire un arc de cercle, décrit une cycloïde.

85. Dans ce que nous venons d'énoncer, nous avons fait abstraction de la résistance de l'air, par conséquent tous les résultats du calcul que nous avons énoncés ne sont vrais que pour un corps qui se mouvrait dans le vide.

Lorsqu'un corps tombe dans l'air, sa vitesse tend à devenir uniforme, parce que la résistance de l'air tend à détruire à chaque instant l'accélération de la pesanteur; mais, en général, les lois du mouvement d'un corps dans l'air se rapprochent d'autant plus de celles du vide que le corps est plus dense, c'est-à-dire que, sous le même volume, il renferme plus de matière.

D. *Intensité de la pesanteur et ses variations à la surface de la Terre.*

86. Lorsqu'une force n'agit que par une seule impulsion, le corps se meut uniformément, et son intensité se mesure par la vitesse qu'elle imprime ; mais il n'en est pas ainsi lorsqu'un corps est sollicité par une force accélératrice, car la vitesse change alors à chaque instant.

87. La force accélératrice que nous cherchons à mesurer, est de celles qu'on désigne sous le nom de Constantes, parce que les actions consécutives sont égales entre elles. Il est évident que deux forces accélératrices constantes sont proportionnelles à ces petites impulsions, et par conséquent aux vitesses produites après le même temps; car, si l'on conçoit deux corps sollicités par deux forces de cette nature, il est clair qu'après le même temps, leurs vitesses se composant de la somme des vitesses dues aux petites impulsions qu'ils ont reçues, seront dans le même rapport que ces petites impulsions elles-mêmes, puisque se succédant d'une manière continue, dans le même temps, elles seront en même nombre. Ainsi les forces accélératrices constantes sont proportionnelles aux vitesses qu'elles produisent après le même temps ; nous pouvons donc prendre, pour mesure des forces accélératrices, les vitesses à la fin de la première unité de temps. Pour mesurer ces vitesses, il faudrait pouvoir arrêter l'action de la force accélératrice à la fin de la première unité de temps; le corps se mouvrait uniformément, et l'espace

qu'il parcourrait dans la seconde unité représenterait la vitesse acquise à la fin de la première. Mais comme c'est une chose en général impossible, on y supplée par une propriété que nous avons énoncée lorsqu'il a été question des lois de la chute des corps, qui consiste en ce que l'espace parcouru dans un temps quelconque, par un corps qui tombe librement, est double de celui que le corps parcourrait uniformément dans le même temps avec la vitesse acquise (1). Ainsi la mesure d'une force accélératrice est double de l'espace qu'elle fait parcourir à un corps dans l'unité de temps. Reste maintenant à mesurer cet espace.

88. Lorsqu'un corps est soumis à l'action de la pesanteur, et qu'il se précipite vers la surface de la terre, son mouvement est beaucoup trop rapide pour qu'on puisse mesurer directement et avec exactitude l'espace parcouru dans l'unité de temps : on pourrait, à la vérité, le ralentir au moyen de la machine d'Athood, ou en le faisant tomber sur un plan incliné ; mais, pour en déduire l'espace qu'il aurait parcouru librement, il faudrait avoir égard, non-seulement à la disposition géométrique de l'appareil, mais encore au frottement et à beaucoup d'autres circonstances qui offriraient de trop grandes causes d'erreur. C'est encore au moyen du pendule qu'on parvient facilement à déterminer l'intensité de la pesanteur. En effet, nous avons dit qu'il y avait entre la durée de ses oscillations, sa longueur et l'intensité de la pesanteur, une relation nécessaire, au moyen de laquelle on pouvait déduire l'une quelconque de ces trois quantités de la connaissance des deux autres. Ainsi, en mesurant exactement le nombre des oscillations d'un pendule pendant un intervalle déterminé, on en déduira la durée d'une oscillation avec une précision qui sera d'autant plus grande que le nombre des oscillations comptées sera plus considérable. Sa longueur sera celle du pendule simple qui lui correspond, et dont on calculera la longueur par les règles connues ; et on en déduira l'intensité de la pesanteur dans le lieu où l'on observe.

C'est ainsi qu'à Paris on a trouvé que l'intensité de la pesanteur était

(1) On peut facilement démontrer cette propriété, en observant que l'espace parcouru pendant le temps A D (*fig.* 32) est représenté par le triangle A D E ; que l'espace parcouru uniformément pendant le temps D B, est représenté par le rectangle D B E F ; et qu'en supposant A D égal à D B, le triangle A D E est égal à la moitié du rectangle D B E F.

de $9^m,8088$, c'est-à-dire qu'un corps qui se mouvrait librement dans le vide, acquerrait cette vitesse à la fin de la première seconde, et que, par conséquent, l'espace parcouru pendant la première seconde serait de $4^m,9044$.

89. En répétant ces expériences dans différens lieux de la terre, on a trouvé que l'intensité de la pesanteur allait en diminuant du pôle à l'équateur.

En désignant par g la pesanteur en un lieu dont la latitude est de 50°, et par g' la pesanteur en un autre lieu quelconque dont la latitude est représentée par ψ, la valeur de g' est donnée par l'équation.

$$g' = g\,(1 - 0{,}002837.\ \cos.\ 2\,\psi).$$

Du pôle à l'équateur la pesanteur diminue de $\frac{1}{178}$ de sa valeur moyenne.

90. Cette diminution de pesanteur est occasionnée, 1° par l'aplatissement de la terre; 2° par la force centrifuge. L'influence de l'aplatissement de la terre est évident; car les corps qui sont à l'équateur sont plus éloignés du centre d'attraction du sphéroïde terrestre, et, par conséquent, ils sont moins attirés. Pour concevoir l'effet de la seconde cause, il faut se souvenir que la terre tourne sur elle-même en 24 heures, et, par conséquent, que tous les points de sa surface décrivent, dans le même temps, des cercles dont le rayon va en décroissant de l'équateur aux pôles. Or, toutes les fois qu'un corps tourne, il tend à chaque instant, en vertu de son inertie, à s'échapper par la tangente à la courbe qu'il décrit; et il ne peut se maintenir sur cette courbe qu'au moyen d'une force dirigée vers le centre du cercle, qui fait alors équilibre à la force centrifuge. Lorsqu'on fait tourner une fronde, c'est la force centrifuge qui produit la tension du fil; c'est la force centrifuge qui retient un liquide dans un vase qu'on fait tourner rapidement à l'extrémité d'une corde.

91. On a trouvé que, dans le cercle, la force centrifuge était égale à $\frac{v^2}{r}$, v représentant la vitesse, et r le rayon du cercle décrit.

92. Dans le cas dont il s'agit, pour chaque point de la terre, la force centrifuge est proportionnelle à la distance de ce point à l'axe de rotation.

En effet, la vitesse est proportionnelle aux circonférences décrites, puisqu'elles le sont dans le même temps. Donc, en prenant la durée de la rotation de la terre pour unité de temps, $v^2 = 4\,\pi\,R^2$ et, par conséquent, la force centrifuge est égale à $4\,\pi\,R$.

Il suit de là que la force centrifuge va en diminuant du pôle à

l'équateur ; mais son influence sur la pesanteur diminue encore plus rapidement ; car à l'équateur elle est opposée à la pesanteur et la diminue de toute son intensité ; au lieu que partout ailleurs la force centrifuge M F (*fig.* 40) étant toujours perpendiculaire à l'axe de rotation, une portion seulement de cette force diminue la pesanteur : car on peut décomposer la force M F en deux autres M D et M C, l'une verticale, l'autre horizontale ; la première seule diminuera la pesanteur ; l'autre, agissant perpendiculairement, ne produira aucun effet.

93. A l'équateur la force centrifuge est $^1/_{289}$ de la pesanteur ; et comme la force centrifuge croît proportionnellement au carré de la vitesse, si la terre tournait 17 fois plus vite, cette force à l'équateur serait égale à la pesanteur.

E. *Machines destinées à mesurer le poids des Corps.*

94. Nous avons vu que le poids d'un corps est proportionnel à sa masse ; par conséquent, les poids peuvent servir à mesurer la quantité de matière renfermée dans les corps.

95. Il en est de la mesure des poids comme de toutes les autres mesures : nous sommes obligés de choisir une unité pour terme de comparaison. Long-temps on s'est servi d'unités entièrement arbitraires, et dont la grande variété présentait de graves inconvéniens. Aujourd'hui l'unité de poids, qu'on nomme gramme, est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée à la température de 4 degrés. Le mètre est la 40,000,000 partie du méridien. On pourrait le retrouver s'il était perdu, ou par une nouvelle mesure de la terre, ou par la longueur du pendule qui bat la seconde ; car on connaît sa longueur en mètre et en fractions de mètre, et la masse de la terre ainsi que la durée de sa révolution diurne étant invariables, la longueur du pendule qui bat la seconde l'est pareillement.

Mais indépendamment de l'avantage que présente le système des nouvelles mesures sous le rapport de la fixité de l'unité fondamentale de laquelle toutes les autres dérivent, le système décimal, appliqué à la formation des multiples et des sous-multiples de l'unité, offre dans le

calcul une simplicité et une régularité si avantageuses que, seules, elles auraient dû décider l'adoption du système métrique.

96. Les appareils qui servent à mesurer les poids, portent le nom de Balances. Celles dont l'usage est le plus répandu et qui, seules, sont susceptibles de précision, sont composées d'une barre métallique, mobile autour d'un point central; à ces deux extrémités sont suspendues deux coupes destinées à recevoir les corps dont la balance doit constater l'égalité de poids. Pour qu'un semblable appareil remplisse l'objet auquel il est destiné, il doit, dans sa construction, satisfaire à certaines conditions que nous allons énoncer.

97. Pour que des poids égaux placés dans les coupes soient en équilibre stable lorsque le fléau est horizontal, il faut 1.° que sans les poids la balance soit en équilibre dans cette position; 2.° que cet équilibre soit stable (1); 3.° que les points de suspension des coupes soient à égale distance du centre de rotation. La nécessité des deux premières conditions est évidente; celle de la troisième résulte de la proportion énoncée (31), et de ce que la résultante des deux poids doit passer par le point de suspension.

98. Pour que la balance soit en équilibre dans la position horizontale du fléau, il faut que, dans cette position, la verticale du centre de gravité passe par le point de suspension; car on peut remplacer la pesanteur de la balance par une force unique égale à son poids et appliquée à son centre de gravité; et comme on peut appliquer une force dans un point quelconque de sa direction, si elle passe par un point fixe, elle sera détruite. Pour remplir la 2me condition, il faut que le centre de gravité soit au-dessous du point de suspension; car, si on représente (*fig.* 41) par A B la ligne horizontale qui, dans la position d'équilibre, passe par le point de rotation O, et par G le centre de gravité, placé au-dessus du point de suspension; si l'on fait prendre au fléau la position A' B', le point G viendra en G' du côté du fléau qui s'est

(1) Un corps est en équilibre stable, lorsqu'étant très-peu dérangé de sa position, il tend à y revenir. Un corps est en équilibre instantané lorsqu'étant infiniment peu dérangé de cette position, il l'abandonne sans retour.

abaissé, et la force appliquée au centre de gravité entraînera le fléau jusqu'à ce que ce centre de gravité soit descendu au-dessous du point de suspension. Si le centre de gravité était au point de rotation même, l'équilibre existerait dans toutes les positions possibles, et enfin si le centre de gravité (*fig.* 42) est situé au-dessous du point de suspension, en inclinant le fléau, le centre de gravité passe du côté qui s'est relevé, et par conséquent la balance est ramenée à sa position d'équilibre primitive.

Une propriété très-remarquable du centre de gravité conduit encore aux mêmes conséquences. Cette propriété consiste en ce que le centre de gravité d'un corps tend toujours à descendre le plus bas possible ; il en résulte que, pour qu'un corps pesant revienne à sa position lorsqu'il en a été écarté, il faut que, dans le mouvement qu'on lui fait éprouver, le centre de gravité monte, et c'est ce qui n'a lieu, dans le cas dont il s'agit, qu'autant que le centre de gravité est au-dessous du point de suspension.

Quant à la 3me condition, elle paraît facile à remplir ; mais dans la pratique elle présente de si grandes difficultés qu'on ne doit jamais compter qu'elle soit exactement satisfaite lorsqu'il s'agit de faire des expériences précises. Mais on a imaginé un procédé très-simple pour peser un corps au moyen d'une balance dans laquelle les points de suspension des coupes seraient à d'inégales distances du point de rotation. Ce procédé, qui porte le nom de Méthode de la Double Pesée, consiste à mettre dans un plateau le corps qu'on veut peser, à l'équilibrer avec du sable, et ensuite à remplacer le corps par des poids. Il est évident que le corps et les poids ayant fait successivement et dans les mêmes circonstances, équilibre à la même quantité de sable, leurs masses sont parfaitement égales (1).

99. Outre les conditions dont nous venons de parler, et qui sont indispensables pour qu'une balance puisse remplir son objet, il en est encore d'autres qui sont destinées à la rendre très-sensible, et à lui faire conserver

(1) On attribue à Borda la découverte de la méthode de la double pesée ; mais c'est au P. Amiot qu'appartient réellement l'honneur d'avoir fait une découverte si simple mais si utile ; car, cette méthode se trouve développée dans une lettre de ce savant Missionnaire, datée de Pekin, le 15 octobre 1753, et imprimée dans les mémoires de l'observatoire de Marseille.

cette sensibilité. Ces conditions sont : 1.° que le centre de gravité soit très-rapproché du point de suspension ; 2.° que les points de suspension des coupes et le point de rotation soient sur une même ligne droite ; 3.° l'inflexibilité du fléau, du moins relativement aux poids sur lesquels on opère ; la dureté et le fini des couteaux de suspension, et une grande longueur dans l'éguille qui sert à indiquer la position du fléau.

Pour concevoir l'influence de la première condition, il faut savoir que lorsqu'un corps peut tourner autour d'un point fixe, l'effort de chaque force pour produire cet effet est représenté par le produit de l'intensité de la force multipliée par la longueur de la perpendiculaire abaissée du centre de rotation sur sa direction. Or, lorsque dans un des plateaux on met un corps plus pesant que l'autre, la différence des poids agit d'abord à l'extrémité du bras du levier A O (*fig.* 42) et la balance s'incline ; mais comme à mesure que l'inclinaison devient plus grande, le point A se rapproche de la verticale du point de suspension, l'effet de cette force va en décroissant ; tandis que le centre de gravité étant au-dessous du point de suspension, à mesure que le fléau s'incline, ce point s'écarte de la verticale du point de rotation, et du côté opposé ; par conséquent, l'effet de la force qui y est appliquée, croît avec l'inclinaison. Il y aura donc, si la différence des poids n'est pas très-considérable, une position dans laquelle ces deux forces se feront équilibre ; et, pour la même différence de poids, l'inclinaison du fléau dans cette position d'équilibre sera d'autant plus grande que la distance du centre de gravité au point de suspension sera plus petite.

La seconde condition est destinée à rendre la position du centre de gravité indépendante des poids dont on charge les plateaux ; en effet, lorsque les trois points de suspension sont en ligne droite, les poids des corps posés dans les plateaux peuvent être considérés comme appliqués aux points de suspension de ces plateaux ; et si ces poids sont égaux, leur résultante passera par le point de rotation, quelle que soit l'inclinaison de la balance, et elle y sera constamment détruite.

Quant aux autres conditions, leur influence sur la sensibilité de l'instrument est si évidente, que nous nous abstiendrons de les examiner en détail.

On peut facilement vérifier tout ce que nous venons de dire, au moyen de l'appareil (*fig.* 43) dans lequel on peut faire varier la position du centre de gravité par un écrou M, et la hauteur des points de suspension par les vis P et Q, qui portent les pointes sur lesquelles sont posés les godets qui suspendent les coupes.

Nous avons cru devoir placer ici la description de la balance de Fortin, attendu que toutes les circonstances s'y trouvent réunies de la manière la plus avantageuse à l'exactitude et à la sensibilité de l'appareil.

Le fléau A B (*fig.* 44), parfaitement symétrique, est suspendu par un couteau d'acier trempé, sur un plan horizontal *m n* de même substance; les couteaux A et B supportent les crochets des coupes; une aiguille *a b*, fixée à angle droit sur le fléau, indique sur une portion de cercle, divisée C D, la position du fléau; deux fourchettes M et M', qui peuvent se mouvoir verticalement au moyen de la manivelle N, sont destinées à ramener le fléau à sa position horizontale, à éviter de trop grandes oscillations, et enfin à le soulever lorsqu'on ne fait point usage de l'appareil, pour que le tranchant du couteau souffre moins; des niveaux à bulles d'air servent à rendre le plan *m n* parfaitement horizontal. Tout l'appareil est renfermé dans une cage de verre, afin d'éviter les mouvemens que produirait l'agitation de l'air; et dans l'intérieur de la cage on place des substances propres à dessécher l'air qui y est renfermé, afin d'éviter l'oxidation des couteaux et des coussinets d'acier, qui, devant être toujours très-polis, ne peuvent être couverts de vernis. Ces balances sont d'une si grande précision, que, chargées d'un kilogramme, elles trébuchent à la millième partie d'un gramme.

100. Avant de passer outre, nous devons avertir d'une cause d'erreur qu'il est impossible d'éviter : dans l'air, le poids d'un corps est toujours diminué de celui d'un égal volume d'air atmosphérique; cette perte de poids étant proportionnelle au volume, affecte inégalement les corps qui n'ont pas la même densité. Ainsi, le corps dont on veut mesurer le poids n'ayant pas la même densité que les corps dont on se sert pour terme de comparaison, il y a une erreur qui est différente pour chaque corps, et qui varie encore suivant l'état de l'air. Heureusement ces erreurs sont très-petites, et peuvent presque toujours être négligées.

§ III.

Attraction Moléculaire.

101. Lorsque les corps sont placés à une très-petite distance, ils s'attirent souvent avec une énergie capable de vaincre, non-seulement leur propre pesanteur, mais encore des forces beaucoup plus considérables. Cette attraction ne se manifeste presque qu'au contact et paraît n'exister qu'entre les molécules ; c'est pourquoi on l'a désignée sous le nom d'Attraction Moléculaire, pour la distinguer de la gravitation et de la pesanteur qui agissent sur les masses et à toutes les distances. C'est cette attraction qui produit l'adhérence des corps qu'on applique les uns contre les autres. Elle concourt avec la force répulsive de la chaleur à produire les différens états des corps. C'est elle qui produit les phénomènes capillaires ; et enfin, si, comme cela est très-probable, elle n'est pas la seule cause des phénomènes chimiques, si l'électricité est la cause qui détermine les combinaisons, c'est l'attraction qui maintient réunies les molécules de nature différente après la neutralisation des électricités.

102. On ne connaît point les lois auxquelles l'attraction moléculaire est soumise ; on sait seulement que cette force ne se manifeste qu'autant que les molécules sont à de très-petites distances, et qu'alors son intensité dépend de la nature des molécules, et qu'elle augmente avec une grande rapidité à mesure que la distance diminue.

103. On peut expliquer l'attraction moléculaire en admettant que l'expression analytique de l'attraction des molécules des corps est composée de deux termes ; l'un, en raison directe des masses et en raison inverse du carré de la distance, aurait une valeur finie à toutes les distances possibles ; et l'autre, qui dépendrait de la nature des molécules, aurait, à de très-petites distances, une très-grande valeur ; mais décroissant avec une très-grande rapidité, il deviendrait sensiblement nul à toute distance appréciable pour nos organes. La première partie de cette attraction produirait la gravitation et la pesanteur ; et la seconde donnerait naissance à l'attraction moléculaire.

On peut encore expliquer l'attraction moléculaire en admettant que tous les points matériels jouissent de la propriété de s'attirer en raison directe de leur masse, et en raison inverse du carré de la distance. De cette supposition il s'ensuivrait que l'attraction moléculaire serait le résultat de l'influence des formes des molécules. Nous admettrons cette dernière hypothèse parce qu'elle est plus simple que la première, et qu'elle satisfait à tous les phénomènes. Nous allons la développer.

104. Nous avons vu que tous les corps célestes jouissent de la propriété de s'attirer, et que cette attraction, combinée avec une impulsion initiale, fait persister le système du monde dans l'ordre établi; nous avons reconnu ensuite qu'à la surface de la terre les corps s'attirent, et que c'est l'attraction du sphéroïde terrestre qui produit la pesanteur. Toutes ces attractions, déduites rigoureusement des faits observés, conduisent nécessairement à reconnaître que les molécules des corps s'attirent, et que l'attraction des masses n'est que la résultante des attractions partielles des molécules qui les composent. D'ailleurs, c'est en partant du principe que toutes les molécules de la matière s'attirent en raison inverse du carré de la distance, qu'on est parvenu à découvrir les lois de la gravitation des corps célestes, celles des perturbations occasionnées par l'aplatissement de plusieurs d'entr'eux, et enfin toutes les lois de la pesanteur.

105. L'attraction des molécules de la matière, qui se manifeste à la distance immense qui sépare les corps célestes, et à des distances beaucoup plus petites pour produire la pesanteur et les attractions que Cavendish a reconnu exister entre les corps à la surface de la terre, doit également se manifester à toutes les distances possibles, quelques petites qu'elles soient. Mais les molécules des corps n'étant jamais sphériques, la loi de leur attraction doit éprouver de grandes anomalies, lorsque ces molécules sont à des distances très-petites par rapport à leurs dimensions. En effet, lorsque des corps sont sphériques et composés de points matériels qui s'attirent en raison inverse du carré de la distance, ces corps s'attirent suivant la même loi et comme si leur masse était réunie à leur centre. Mais si ces corps n'ont point une forme sphérique,

leur attraction est composée de deux parties, l'une qui suit la raison inverse du carré de la distance, et l'autre qui résulte du défaut de sphéricité, décroît suivant le cube de la distance; cette 2e partie, décroissant beaucoup plus rapidement que la première, est très-petite lorsque les corps sont à de très-grandes distances, et ne peut alors occasionner dans les mouvemens relatifs que des anomalies insensibles; mais à mesure que ces corps se rapprochent, elle augmente plus rapidement que la première et acquiert une influence toujours croissante. Ainsi, par exemple, lorsque deux corps d'une forme quelconque sont placés à une certaine distance, si l'on rend cette distance dix fois plus grande, la partie de leur attraction qui dépend de leur figure diminuera dix fois plus que l'autre; de même elle augmenterait dix fois plus si l'on rendait la distance des corps dix fois plus petite. Tel est la nature de l'attraction réciproque de la terre et de la lune; l'aplatissement de la terre fait naître dans leurs mouvemens des perturbations qui deviendraient bien plus influentes si ces corps étaient plus rapprochés, et qui s'évanouiraient si ces corps étaient beaucoup plus éloignés. Ainsi, lorsque les corps ont one forme quelconque, à une grande distance, ils s'attirent comme s'ils étaient sphériques; mais, à des distances très-petites par rapport à leurs dimensions, leur forme fait naître une nouvelle force qui s'ajoute à la première et qui augmente avec une rapidité prodigieuse à mesure que la distance diminue. Mais ce n'est point encore en cela seul que consiste l'influence de la forme des corps; lorsqu'ils sont sphériques, ils s'attirent également dans toutes les directions, et il n'en est plus ainsi lorsqu'ils n'ont point cette forme régulière; ils s'attirent alors inégalement par leurs différentes faces, et en général davantage par celles qui sont plus voisines de leur centre de gravité. C'est en partie par cette raison que la pesanteur est plus grande au pôle qu'à l'équateur.

106. Tout ce que nous venons de dire des masses est à la fois le résultat du calcul et de l'observation, et nous paraît immédiatement applicable aux molécules; car les molécules, quoique invisibles pour nous, n'en ont pas moins des dimensions finies, et puisqu'elles s'atti-

rent, on peut admettre que les points matériels qui les composent jouissent de la même propriété ; alors leur attraction sera la résultante des attractions partielles des points matériels qui les composent, et cette attraction sera en raison inverse du carré de la distance toutes les fois qu'elles seront très-éloignées les unes des autres, ce qui arrivera pour toutes les molécules qui appartiennent à des corps différens, quelle que soit d'ailleurs la distance qui sépare ces corps, pourvu qu'ils ne soient pas en contact ; car les molécules sont si petites que toute distance appréciable pour nous est en quelque sorte infinie relativement à leurs dimensions ; par conséquent, l'influence de leur figure ne pourra se développer qu'à des distances insensibles pour nos organes.

107. Pour expliquer par l'influence de la figure des molécules, l'énergie des forces qui se développent dans les corps à une très-petite distance, il faut admettre que les densités des molécules sont incomparablement plus grandes que celles des corps qu'elles forment par leur réunion, et, par conséquent, que la distance des molécules est beaucoup plus grande que leur diamètre ; or ces nouvelles suppositions ne sont point en opposition avec les faits observés ; au contraire, la facilité avec laquelle les fluides impondérables traversent les corps et beaucoup d'autres phénomènes les rendent très-probables.

Ainsi, en résumant ce qui précède, c'est l'attraction des points matériels qui paraît constituer l'attraction des molécules ; c'est l'influenee des formes des molécules qui, à de petites distances, donne naissance à l'attraction moléculaire, et enfin, c'est l'attraction des molécules, dégagée de l'influence de leur figure, qui produit la pesanteur et la gravitation.

§ IV.

Force répulsive de la Chaleur.

108. Lorsqu'un corps s'échauffe, il se dilate dans tous les sens, et lorsqu'il se refroidit, il se contracte ; de ce fait, constaté par une infinité d'expériences, il résulte que, dans les corps, les molécules ne se touchent jamais ; et puisque c'est en accumulant la chaleur dans les corps qu'on

éloigne les molécules, et que c'est en enlevant ce fluide qu'on les rapproche, il faut nécessairement admettre que la chaleur, quelle que soit sa nature, agit comme une force répulsive.

109. Dans tous les phénomènes, la chaleur agit toujours comme un fluide dont les molécules d'une ténuité extrême se repousseraient mutuellement et seraient attirées par les molécules des corps pondérables. Cette hypothèse représentant parfaitement bien tous les phénomènes, nous l'admettrons.

110. Nous regarderons donc les corps comme composés de molécules semblables et égales, éloignées les unes des autres, et dont chacune est environnée d'une atmosphère de calorique ; nous aurons donc à considérer dans les corps : 1.° l'attraction des molécules pondérables ; 2.° la force répulsive de la chaleur ; 3.° l'attraction des molécules pondérables sur la chaleur. C'est l'existence simultanée de ces trois forces qui produit les différens états que les corps peuvent affecter.

111. Dans les corps solides, l'attraction des molécules est en équilibre avec la force élastique de la chaleur ; car, lorsqu'un corps solide est soustrait à toute action étrangère, ses molécules sont à distance et en repos, ce qui ne peut exister qu'autant que les forces qui les sollicitent se font mutuellement équilibre (1). L'équilibre est stable relativement à la distance, c'est-à-dire que, si l'on imprime aux molécules un très-petit mouvement, suivant la ligne qui passe par les centres de gravité, ces molécules tendront à revenir à leur position initiale. En effet, la force répulsive de la chaleur éprouvant, par les mouvemens des molécules, des variations plus rapides que leur attraction (2), si on rapproche les molécules, l'accroissement de la force répulsive sera plus grand que celui de l'attraction, et par conséquent la force répulsive devenant dominante ramènera les molécules à leur position initiale. Si au contraire on les

(1) Plusieurs auteurs ont prétendu que, dans les corps solides, l'attraction des molécules était plus grande que la force répulsive de la chaleur, ce qui est impossible; car, s'il en était ainsi, rien ne s'opposerait à ce que les molécules se rapprochent davantage; et elles se mouvraient alors jusqu'à ce que ces deux forces fussent en équilibre. En général toutes les fois que des corps sont en équilibre, il faut nécessairement que les forces qui les sollicitent se détruisent mutuellement.

(2) C'est ce que nous démontrerons plus tard.



éloigne, la force répulsive diminuant plus rapidement que l'attraction, cette dernière deviendra plus grande, et les molécules seront encore ramenées à leur position d'équilibre. L'équilibre est stable par rapport aux positions relatives des molécules, parce que ces molécules étant à une distance assez petite pour que leur attraction soit modifiée par leur forme, l'équilibre dépend non-seulement de la distance des centres de gravité, mais encore des positions relatives des molécules; de sorte que chacune d'elles devant conserver la même distance à celles qui l'environnent et leur présenter les mêmes faces, ne pourra changer de position. Cependant cette stabilité d'équilibre de position dépendant de la distance des molécules, et cette distance pouvant être augmentée par l'accumulation de la chaleur, on conçoit facilement qu'on pourra, en échauffant un corps solide, diminuer continuellement l'influence de la figure des molécules, et, par conséquent, la stabilité de leur équilibre. Pour séparer les molécules les unes des autres, il faut employer une force capable de vaincre la différence qui se développe entre l'attraction et la force répulsive lorsqu'on a déjà commencé à éloigner les molécules les unes des autres. C'est cette force qu'on appelle cohésion. On la regarde ordinairement comme la force qui retient les molécules et qui est toute développée dans les corps; mais il n'en est pas ainsi, puisque les molécules sont à distance et en équilibre. La cohésion est une force qui ne se manifeste que quand on a commencé à écarter les molécules.

112. Dans les corps liquides, l'attraction et la force répulsive de la chaleur sont encore en équilibre; car les molécules d'une masse liquide sont en repos lorsqu'elles ne sont pas soumises à des forces étrangères. L'équilibre est stable relativement à la distance des molécules par la même raison que dans les corps solides. Mais l'équilibre n'est plus stable par rapport aux positions relatives des molécules, car elles sont assez éloignées les unes des autres pour que leur forme n'ait plus aucune influence sensible sur leur attraction. Elles s'attirent comme si elles étaient sphériques, et, par conséquent, elles peuvent tourner les unes autour des autres, prendre toutes les positions relatives possibles sans que l'équilibre soit rompu, pourvu que la distance des centres de gravité reste constante.

Nous verrons cependant, par la suite, que, dans la plupart des liquides, l'influence de la figure n'est pas complétement anéantie, et que c'est à une petite portion de cette influence qu'est due la viscosité de plusieurs d'entr'eux. Dans les corps liquides comme dans les corps solides, il y a encore une cohésion qui se développe lorsqu'on sépare les molécules. Jusqu'ici on a confondu la cohésion des corps liquides avec leur viscosité. On conçoit cependant très-bien, d'après ce qui précède, qu'un liquide qui serait parfait, dans le sens que l'influence de la figure des molécules serait nulle, et qui serait, par conséquent, complétement dépourvu de viscosité, pourrait encore avoir une très-grande cohésion. L'évanouissement partiel ou total de l'influence de la figure des molécules dépendant uniquement de leur distance, il est évident que, par la chaleur, on pourra faire passer un corps de l'état solide à l'état liquide; et c'est ce qui existe, en effet, pour la plupart des corps connus.

113. Dans les corps gazeux, la force élastique de la chaleur l'emporte sur l'attraction moléculaire, car ces corps tendent continuellement à augmenter de volume, et ils ne peuvent rester en repos qu'autant que cette force élastique est détruite par la résistance des vases qui les renferment ou par des forces étrangères.

114. Les corps agissant d'une manière très-inégale sur la chaleur, il en résulte que, dans les mêmes circonstances, les corps se présentent dans des états différens; Car la densité des atmosphères de calorique qui environnent les molécules, et par conséquent leur force élastique, dépendent uniquement de l'attraction des molécules pondérables pour le calorique; on conçoit facilement que plus cette attraction sera grande, plus les molécules seront éloignées, plus l'influence de leur figure sera petite, et, par conséquent, que, dans les mêmes circonstances, certains corps peuvent être solides, tandis que d'autres sont liquides ou gazeux.

RÉSUME DU CHAPITRE II.

Forces permanentes qui agissent sur les Corps.

GRAVITATION.

La comparaison d'un grand nombre d'observations conduisit Képler à reconnaître, dans le système du monde, les trois lois suivantes : 1º les orbites des planètes sont des courbes planes, et les rayons vecteurs décrivent des espaces proportionnels aux temps ; 2º les orbites sont des ellipses dont le soleil occupe un des foyers ; 3º les carrés des temps des révolutions sont proportionnels aux cubes des grands axes. Newton trouva que de ces lois il résultait nécessairement que tous les corps célestes s'attirent en raison inverse du carré de la distance de leur centre de gravité, proportionnellement au produit de leurs masses, et qu'à la même distance du soleil, les planètes seraient également attirées ; d'où il conclut encore que toutes les molécules de la matière s'attirent en raison directe du produit de leur masse, et en raison inverse du carré de leur distance, et que les mouvemens des corps célestes sont le résultat de cette attraction combinée avec une impulsion initiale.

PESANTEUR.

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

La pesanteur est la force avec laquelle les corps se précipitent vers la surface de la terre.
Tous les corps coercibles sont pesans.
C'est l'air qui soutient les corps qui restent suspendus dans l'atmosphère, et qui produit la force ascensionnelle de plusieurs autres.
Les corps s'attirent à la surface de la terre.
C'est l'attraction de la masse de la terre qui produit la pesanteur.

LOIS DE LA PESANTEUR.

La terre est sensiblement sphérique. Elle agit comme si sa masse était réunie à son centre. La direction de la pesanteur, qu'on nomme verticale, passe toujours par le centre de la terre, et varie, par conséquent, lorsqu'on passe d'un lieu à un autre.
Les corps soumis à la pesanteur étant très-petits relativement au rayon de la terre, on peut considérer la pesanteur des molécules comme des forces égales et parallèles : le point d'application de leur résultante porte le nom de Centre de Gravité ; sa position est invariable. On peut toujours remplacer la pesanteur des molécules d'un corps par une force unique verticale, égale au poids du corps, et appliquée à son centre de gravité.
Au-dessus de la surface de la terre, l'intensité de la pesanteur varie en raison inverse du carré de la distance au centre de la terre.
Dans l'intérieur du globe, la pesanteur varie proportionnellement à la distance au centre.
Des masses inégales d'un même corps tombent de la même hauteur dans le même temps, et leur vitesse de la chute est égale à celle d'une seule molécule.
Des masses inégales de corps différens tombent dans le vide de la même hauteur dans le même temps ; par conséquent, tous les corps sont également pesans.
Les masses des corps sont proportionnelles à leurs poids.

LOIS DE LA CHUTE D'UN CORPS A UNE PETITE DISTANCE DE LA SURFACE DE LA TERRE.

Chute d'un corps libre.

On peut regarder les impulsions successives pendant la chute comme égales entre elles ; il en résulte que :
1º Les vitesses sont proportionnelles aux temps.
2º Les espaces parcourus sont comme les carrés des temps employés à les parcourir.
3º Les espaces parcourus pendant des instans égaux et successifs sont entre eux comme la série des nombres impairs.

Chute d'un corps sollicité par une force initiale constante.

L'impulsion étant verticale et dirigée dans le sens de la pesanteur, la vitesse à chaque instant est égale à la somme des vitesses dues à chacune de ces forces ; l'impulsion verticale étant dirigée en sens contraire de sa pesanteur, la vitesse à chaque instant est la différence de celles qui résultent de ces deux forces ; les vitesses en montant et en descendant sont les mêmes à des hauteurs égales, et la durée de la chute est égale à celle du mouvement ascensionnel.
Si l'impulsion n'est pas perpendiculaire à l'horizon, la courbe décrite est une parabole dont l'axe est vertical.

LOIS DE LA CHUTE D'UN CORPS A UNE PETITE DISTANCE DE LA SURFACE DE LA TERRE.

Chute d'un corps sur une ligne droite ou sur une ligne courbe.

- Sur une ligne droite, la pression est constante, et le mouvement est uniformément accéléré comme la chute verticale.
- Sur une courbe quelconque, la vitesse à la fin de la chute est égale à celle que le corps aurait acquise par une chute verticale; lorsque plusieurs corps partent en même temps de la même hauteur en suivant des courbes quelconques, les vitesses sont les mêmes à des hauteurs égales.
- La cycloïde est une courbe plane engendrée par un point d'un cercle qui roule sur une ligne droite, dans le même plan.
- La courbe de plus vite descente d'un point à un autre est une cycloïde à base horizontale, et dont l'origine est au point de départ.
- La durée de la chute d'un corps sur une cycloïde à base horizontale est indépendante de la hauteur du point de départ.

INTENSITÉ DE LA PESANTEUR A LA SURFACE DE LA TERRE.

- Les forces accélératrices constantes sont proportionnelles à la vitesse qu'elles impriment à la fin de l'unité de temps, ou au double de l'espace parcouru pendant le même temps.
- On détermine l'intensité de la pesanteur par l'observation des oscillations du pendule. Sous la latitude de 50°, la pesanteur est de 9,8088, et l'espace parcouru pendant la première seconde de la chute d'un corps libre est de 4m,9044.
- La pesanteur diminue du pôle à l'équateur de $\frac{1}{195}$ de sa valeur moyenne, 1° par l'aplatissement de la terre; 2° par la force centrifuge. A l'équateur la force centrifuge est $\frac{1}{289}$ de la pesanteur. Si la terre tournait 17 fois plus vite, à l'équateur la pesanteur serait détruite entièrement par la force centrifuge.

MACHINES DESTINÉES A MESURER LES MASSES DES CORPS.

- Puisque les masses des corps sont proportionnelles à leurs poids, on peut se servir des poids pour mesurer les masses.
- L'unité de poids est celui d'un centimètre cube d'eau distillée à la température de 4°. Le mètre est la dix-millionième partie du quart du méridien.
- Les appareils destinés à mesurer les poids portent le nom de Balance. Pour qu'une balance à 2 coupes reste en équilibre stable dans la position horizontale lorsqu'elle est chargée de deux poids égaux, il faut, 1° que la balance sans charge soit en équilibre dans cette position, et pour cela la verticale du centre de gravité doit passer par le point de rotation; 2° que cet équilibre soit stable, ce qui exige que le centre de gravité soit au-dessous du point de suspension; 3° que les deux points de suspension extrêmes soient également éloignés du point de rotation. La balance pour être très-sensible doit avoir son centre de gravité très-près du point de rotation; et pour que le centre de gravité ne varie pas avec les poids dont on charge les plateaux, les 3 points de suspension doivent être en lignes droites.
- Méthode de la double pesée.

ATTRACTION MOLÉCULAIRE.

L'attraction moléculaire ne se manifeste qu'à des distances extrêmement petites; il est très-probable qu'elle est produite par l'influence de la figure des molécules. En admettant que tous les points de la matière s'attirent en raison inverse du carré de la distance, l'attraction des molécules sera composée de deux parties: l'une, décroissant en raison inverse du carré de la distance, sera sensible à toutes les distances et produira la gravitation et la pesanteur; l'autre, due à l'influence de la figure, décroissant bien plus rapidement, ne sera sensible qu'à de très-petites distances.

FORCE RÉPULSIVE DE LA CHALEUR.

Dans les corps, les molécules ne se touchent jamais, les intervalles qui les séparent sont remplis par la chaleur; la chaleur agit comme un fluide dont les molécules, d'une ténuité extrême, se repousseraient mutuellement et seraient attirées par les molécules des corps pondérables.

Dans les corps solides, l'attraction des molécules est en équilibre stable avec la force répulsive de la chaleur; les molécules sont assez voisines pour que leur attraction soit modifiée par leur forme; l'équilibre est stable, et par rapport à la distance des centres de gravité, et par rapport aux positions relatives.

Dans les corps liquides, l'équilibre existe encore entre les deux forces qui sollicitent les molécules; mais elles sont assez éloignées pour que leur attraction ne soit point modifiée par leur figure; elles s'attirent comme si elles étaient sphériques, et l'équilibre n'est stable que relativement à la distance des centres de gravité.

Dans les corps gazeux, la force élastique de la chaleur l'emporte sur l'attraction des molécules, et elles tendent à s'éloigner les unes des autres.

La cohésion est une force qui se développe lorsqu'on sépare les molécules des corps; elle est produite par la différence des variations des deux forces qui les sollicitent. Elle est plus grande dans les corps solides que dans les corps liquides; elle est négative dans les gaz.

CHAPITRE III.

Corps solides.

115. Les corps solides sont formés, comme nous l'avons vu, par la réunion d'un nombre plus ou moins considérable de molécules semblables, égales et séparées par des intervalles occupés par le fluide de la chaleur ; la force élastique de la chaleur est en équilibre avec l'attraction des molécules, et la distance de ces dernières est assez petite pour que leur attraction soit modifiée par leur forme.

§ Ier.

Porosité des Corps solides.

116. *Deux espèces de Porosité.* Puisque les molécules des corps solides sont séparées les unes des autres, il en résulte que les corps solides sont poreux. Mais indépendamment de cette porosité moléculaire, dans un grand nombre d'entr'eux les groupes de molécules sont séparés par des intervalles qui sont quelquefois très-considérables. La première espèce de porosité est une propriété générale des corps solides ; la seconde n'est qu'une propriété accidentelle. Les pores moléculaires ne sont perméables qu'aux fluides impondérables ; les autres sont pénétrables par les corps gazeux, par les corps liquides, et même quelquefois par les corps solides.

117. La porosité moléculaire est une conséquence nécessaire des variations de volume que la chaleur fait éprouver aux corps : on peut toutefois la démontrer encore par les expériences suivantes : si, dans un tube de verre, long de plusieurs pieds, de quelques lignes de diamètre, et fermé par une de ses extrémités, on introduit d'abord de l'acide sulfurique concentré, et ensuite un égal volume d'eau, de manière que ces deux liquides ne remplissent pas exactement la capacité du tube ; et si, après avoir fermé la partie supérieure de ce tube, en fondant le verre

à la lampe d'émailleur, on le renverse à plusieurs reprises pour mêler les deux liquides, on observe : 1° qu'il se développe une très-grande chaleur ; 2.° qu'après le refroidissement, le volume de la combinaison est plus petit que la somme des volumes des deux liquides. Aucun atome de matière n'ayant pu s'échapper, il résulte nécessairement que la diminution de volume provient du rapprochement des molécules ; rapprochement qui n'a pu s'effectuer qu'en supposant entre ces molécules des interstices, c'est-à-dire, des pores qui, avant la combinaison, étaient occupés en partie par le calorique, dont une portion s'est dégagée. Une foule d'autres combinaisons chimiques présentent des phénomènes analogues.

118. Presque toutes les substances végétales et animales, et un grand nombre de substances minérales, présentent des pores qui peuvent être pénétrés par les corps liquides et les corps gazeux. Ainsi le bois, le charbon, les peaux, la plupart des pierres, sont facilement pénétrés par l'eau et l'air.

§ II.

Densité.

119. Les masses des molécules étant inégales, et leurs distances étant variables dans les différens corps, il en résulte que, dans les mêmes circonstances, les corps solides, sous le même volume, ne renferment pas la même masse, ni par conséquent le même poids.

120. On dit qu'un corps est plus dense qu'un autre lorsque, sous le même volume, il renferme une plus grande masse.

121. Pour comparer les masses des corps sous le même volume, on est convenu de les rapporter à celle de l'eau distillée à la température de 4° (1). On a choisi l'eau parce que ce corps est très-répandu à la

(1) Nous désignerons sous le nom de température d'un corps l'intensité de la chaleur qui se dégage de ce corps ; on la mesure à l'aide d'un instrument que l'on nomme Thermomètre ; le zéro de cet instrument indique la température de la glace fondante, le 100me degré correspond à la température de l'ébullition de l'eau.

surface du globe ; on a choisi l'eau purifiée par la distillation, parce que la densité de l'eau impure varie avec la nature et la quantité des substances étrangères qu'elle renferme ; enfin, on a dû la prendre à une température déterminée, parce que la chaleur fait aussi varier sa densité : la température de 4° est celle qui correspond à son maximum de densité. On a designé alors sous le nom de *Densité* ou de *Pesanteur spécifique* d'un corps, le nombre de fois que le poids de ce corps contient celui d'un égal volume d'eau distillée à la température de 4° degrés.

122. *Mesure de la Densité des Corps solides.* Pour déterminer la densité d'un corps, il faut connaître le poids de ce corps et celui d'un égal volume d'eau : le quotient du premier poids, divisé par le second, est la densité cherchée. La détermination du poids du corps ne présente aucune difficulté ; le poids d'un égal volume d'eau s'obtient facilement au moyen du principe que nous avons démontré (58), et qui consiste en ce qu'un corps plongé dans un fluide quelconque perd de son poids celui d'un égal volume de ce fluide. On devra donc, pour mesurer la densité d'un corps, le peser successivement dans l'air et dans l'eau, et diviser son poids dans l'air, par la différence de son poids dans l'air et dans l'eau.

123. On peut, pour faire ces expériences, se servir d'une balance ordinaire : on pèse ce corps dans l'air en suivant la méthode ordinaire, et on le pèse dans l'eau en le suspendant dans un vase plein de ce liquide, au moyen d'un fil très-fin attaché à la partie inférieure du plateau de la balance.

124. *Balance de Nickolson.* On peut encore employer pour déterminer la densité des corps un appareil très-commode, qui a été imaginé par Nickolson, dont il a conservé le nom. Cet appareil consiste (*fig.* 45) en un cylindre métallique creux A B C D, terminé supérieurement et inférieurement par les deux cones E A B et F C D. Le premier porte une tige E G, terminée par la capsule M ; à l'extrémité du second est suspendue librement une capsule N remplie de plomb. Cet appareil, plongé dans l'eau, reste en équilibre stable lorsque l'axe E F est vertical (1), et s'enfonce dans

(1) Nous en verrons la raison dans le chap. IV de la 1re partie, lorsqu'il sera question de l'équilibre des corps flottans.

le liquide jusqu'à la ligne *a b* ; on marque sur la tige E G un point quelconque *o* qu'on nomme point d'affleurement. Lorsqu'on veut mesurer la pesanteur spécifique d'un corps au moyen de cet appareil, on commence par déterminer, par l'expérience, les poids dont le plateau supérieur M doit être chargé pour que l'instrument s'enfonce jusqu'au point d'affleurement; ensuite on remplace les poids par le corps, et on fait affleurer de nouveau en ajoutant les poids nécessaires : il est évident que la différence des poids employés dans ces deux opérations représente exactement le poids du corps. On place ensuite le corps dans la capsule inférieure, et on charge encore le plateau M de manière à produire encore l'affleurement ; et comme un corps plongé dans l'eau perd de son poids celui d'un égal volume d'eau, la différence entre la charge de cette dernière opération et celle de la seconde est égale au poids d'un volume d'eau déplacé par le corps. Ainsi, on fait trois affleuremens successifs : le premier avec des poids seulement, le second en plaçant le corps dans la capsule supérieure, le troisième en le plaçant dans la capsule inférieure : la différence entre la première et la seconde charge donne le poids du corps, et la différence entre la troisième et la seconde donne celui d'un égal volume d'eau ; par conséquent, en divisant la première différence par la seconde, on obtiendra la pesanteur spécifique cherchée. Comme cet instrument est peu dispendieux, très-portatif et qu'il est susceptible de donner une grande précision, il est très-souvent employé.

125. L'immersion du corps dans l'eau, qui est une opération indispensable dans la méthode directe et dans l'usage de la balance de Nickolson, présente souvent des difficultés, des causes d'erreurs, et quelquefois même est impossible. Nous allons examiner ces différens cas.

126. Lorsqu'un corps est plus léger que l'eau, on l'oblige à rester au-dessus de ce liquide, en adaptant à la capsule N une grille P Q (*fig.* 46) qui doit faire partie de l'appareil, et qui, par conséquent, doit être placée au commencement des opérations.

127. Lorsqu'un corps renferme des pores perméables à l'eau, ce liquide s'introduit en partie dans ces pores, alors le volume d'eau déplacé est

plus petit que le volume apparent du corps de tout le volume des pores qui ont été pénétrés par l'eau. Il faut alors, pour obtenir le poids d'un volume d'eau égal au volume apparent du corps, ajouter au poids du volume d'eau déplacé celui de l'eau dont le corps peut s'imbiber ; ainsi, à la perte de poids que le corps éprouve par son immersion dans l'eau, il faudra ajouter l'augmentation de poids qu'il acquiert dans l'air lorsqu'il est imbibé d'eau.

Lorsqu'un corps est soluble, décomposable par l'eau, ou susceptible d'éprouver de la part de ce liquide une altération quelconque, la détermination du poids d'un égal volume d'eau par l'immersion dans ce liquide est une opération impossible. Alors, pour obtenir cet élément nécessaire à la détermination de la densité, on commence par déterminer la perte de poids qu'il éprouve lorsqu'il est plongé dans un liquide qui n'exerce sur lui aucune action. Cette perte est le poids d'un égal volume de ce nouveau liquide ; si l'on divise ce poids par la densité de ce liquide, c'est-à-dire, par le nombre de fois que le poids de ce liquide renferme celui d'un égal volume d'eau, il est évident que le quotient sera le poids d'un égal volume d'eau. Nous verrons plus tard de quelle manière on détermine la densité des différens liquides.

Dans ces différentes opérations, la température ne peut jamais être exactement celle de 4°, par conséquent il faut ramener les résultats des opérations à ce qu'ils auraient été si cette condition eût été remplie. Nous n'examinerons la manière de faire ces corrections qu'au chapitre Ier de la IIe Partie.

128. Pour déterminer les masses des corps célestes, on compare les mouvemens qui sont dus à l'attraction de ces masses ; ainsi, en comparant les mouvemens d'une planète autour du soleil au mouvement de ses satellites autour d'elle, on parvient avec une très-grande facilité à déterminer le rapport de leurs masses à celle du soleil.

129. Quant à la masse de la terre, on peut y parvenir d'une manière plus simple en comparant la pesanteur à la surface de la terre avec la pesanteur de la terre sur le soleil ; connaissant alors le volume de la terre et celui du soleil, on peut facilement déduire du rapport des masses celui des densités ; on a trouvé ainsi que la densité de la terre est à peu près 4 fois plus grande que celle du soleil.

130. Pour déterminer la densité moyenne de la terre comparée à celle des corps qui

sont à sa surface, on a employé deux procédés différens, que nous allons indiquer sommairement.

Lorsqu'un fil à plomb est abandonné à lui-même dans une vaste plaine, il se dirige vers le centre de la terre ; mais lorsqu'il est placé dans le voisinage d'une montagne très-élevée, il éprouve une déviation qui provient de l'attraction de cette masse. Ainsi, Bouguer, dans les opérations géodésiques qu'il fit au Pérou, s'aperçut qu'au pied du Chimboraço le fil à plomb déviait de 7 secondes et demie. En 1714, Maskeline, en observant la déviation du fil à plomb, au pied du Mont-Sheballien en Ecosse, reconnut qu'elle s'élevait à 5 secondes $\frac{8}{10}$. Ce dernier, en comparant à l'attraction de la terre, dont on connaît le volume, l'attraction de la montagne dont il avait mesuré et le volume et la densité, trouva que la densité moyenne de la terre était 4,5, c'est-à-dire, 4 fois et ½ plus considérable que celle de l'eau.

Cavendish est encore parvenu à déterminer la densité moyenne de la terre par l'expérience que nous avons indiquée (60) : en comparant les oscillations d'un pendule horizontal produites par les attractions de deux masses sphériques de plomb, à celles d'un pendule vertical sollicité par la pesanteur, il a trouvé que la densité moyenne de la terre était de 5,48. Ces dernières expériences étant susceptibles d'une bien plus grande précision que celles que nous avons citées d'abord, le résultat de Cavendish doit être regardé comme plus voisin de la vérité que celui de Maskeline.

§ III.

Phénomènes qui résultent de la stabilité plus ou moins grande d'équilibre entre les molécules des corps solides.

Lorsqu'un corps quelconque est en équilibre et qu'on le fait tourner d'une manière continue, les positions d'équilibre stable et instantané se succèdent alternativement. Cette propriété est générale ; on peut facilement la vérifier sur un corps pesant de forme quelconque en équilibre sur un plan horizontal. Si ce corps est un prisme à six pans (*fig.* 47), il sera en équilibre stable toutes les fois qu'il touchera le plan par une de ses faces, et il sera en équilibre instantané toutes les fois qu'il le touchera par une de ses arêtes. Lorsque ce corps sera en équilibre stable et qu'on le dérangera de cette position de manière à ne pas dépasser la position suivante d'équilibre instantané, il reviendra à sa position

initiale ; mais si on l'écarte au delà, il dépassera cette position d'équilibre instantané et ira retrouver une nouvelle position d'équilibre stable. Ainsi, dans l'exemple que nous avons choisi, si l'on fait tourner le prisme autour de l'arète A, tant que la verticale du centre de gravité n'aura pas passé au delà de cette arète, le prisme reviendra à sa position initiale ; mais aussitôt qu'elle l'aura dépassé, le prisme ira trouver sur la face A C une nouvelle position d'équilibre stable. Si le prisme n'était terminé que par trois faces latérales, dans sa rotation complète il n'y aurait que trois équilibres stables et trois équilibres instantanés, et, par conséquent, les écarts qu'on pourrait effectuer autour de chaque position d'équilibre stable sans que le corps cessât de revenir, seraient beaucoup plus étendus. Si, au contraire, le nombre des faces latérales du prisme était plus considérable, les positions d'équilibre deviendraient plus nombreuses, et les écarts plus petits. Enfin, quand on supposera que ce prisme devient un cylindre à base circulaire, les équilibres stables se succéderont d'une manière continue, les écarts possibles deviendront nuls, et le corps sera en équilibre dans toutes les positions. Ce dernier cas est la limite où viennent se confondre les équilibres stables et instantanés.

Ce que nous venons de dire d'un prisme posé sur un plan serait évidemment applicable à un polyèdre quelconque. Les positions d'équilibre stable étant toujours en même nombre que les faces, elles s'étendraient à des écarts d'autant plus considérables, que les faces du polyèdre seraient moins nombreuses, et la sphère serait la limite où les positions d'équilibre stable et d'équilibre instantané viendraient se confondre.

En considérant les molécules des corps comme étant terminées par des faces planes, tout ce qui précède leur sera immédiatement applicable ; et si l'on conçoit qu'une de ces molécules roule autour d'une autre, les positions d'équilibre stable et instantané se succéderont alternativement, et les écarts possibles autour de chacune des premières seront d'autant plus grands que les molécules seront terminées par un plus petit nombre de faces.

Il est maintenant très-facile de concevoir en quoi consistent l'élas-

ticité, la ductilité, la fragilité et toutes les autres propriétés physiques des corps solides.

130. *Élasticité*. On appelle élasticité, la propriété que certains corps possèdent de conserver leur forme et de la reprendre lorsqu'elle a été altérée par un mouvement relatif des parties; le retour à la position primitive se fait ordinairement par des oscillations plus ou moins nombreuses autour de cette même position. Ainsi, une tige d'acier fixée d'une manière invariable par une de ses extrémités, courbée et abandonnée à elle-même, revient à sa position initiale, qu'elle dépasse par sa vitesse acquise, pour y revenir ensuite en faisant autour d'elle des oscillations semblables à celles d'un pendule qui a été écarté de sa position d'équilibre. Il est évident que dans l'expérience que nous venons de citer, les molécules ont été dérangées de leur position d'équilibre, et que c'est la force avec laquelle elles tendent à y revenir qui produit l'élasticité de la masse. On conçoit encore qu'il n'existe aucun corps qui ait une élasticité absolue; que toujours, au delà d'une certaine limite, les molécules tendant à reprendre la position d'équilibre suivante, la masse ne peut plus revenir à sa forme initiale. Dans l'exemple que nous avons choisi et dans tous les autres, indépendamment du changement de position relative des molécules, la distance de leurs centres de gravité éprouve aussi des variations; et comme, dans les corps solides, l'équilibre des molécules est stable par rapport aux positions relatives et par rapport aux distances, les forces qui proviennent de cette double stabilité concourent à produire la force élastique. Il paraît qu'en général la force élastique est proportionnelle à la flexion que le corps a éprouvée, et que les oscillations par lesquelles le corps revient à sa position initiale sont sensiblement isochrones.

On parvient, dans les arts, à produire dans certains corps une très-grande élasticité par un changement brusque de température. Ainsi l'acier chauffé à une température plus ou moins élevée, et refroidi brusquement par l'immersion dans l'eau ou dans un liquide quelconque, devient dur, élastique et cassant. Il acquiert ces nouvelles propriétés à un degré d'autant plus élevé que l'abaissement de température a été plus considérable et plus prompt. Cette opération porte le nom de Trempe.

Il est difficile de rendre raison d'une manière satisfaisante de ce développement subit d'élasticité par le seul effet de la trempe. Voici cependant l'explication qu'on en donne ordinairement. L'acier plongé subitement dans l'eau se refroidit d'abord à sa surface, et ce refroidissement ayant lieu avant que les couches intérieures soient revenues à la température ordinaire, il en résulte que cette croûte solide, extérieure, qui se forme d'abord, empêche les molécules intérieures de se rapprocher comme elles l'auraient fait si l'abaissement de température avait eu lieu graduellement: la masse intérieure est donc maintenue dans un état forcé de dilatation. L'expérience indique effectivement que l'acier, par un refroidissement brusque, conserve un plus grand volume que par un refroidissement lent, et, par conséquent, que cette dilatation forcée dont nous venons de parler a réellement lieu. Mais l'on ne voit pas le rapport qui existe entre ce nouvel état et les nouvelles propriétés acquises par l'acier ; d'ailleurs, comment la trempe ne développe-t-elle pas dans les autres métaux des propriétés analogues, et comment expliquer que l'alliage de cuivre et d'étain, qui sert à construire les cymbales et les tams-tams, acquiert par le refroidissement lent une grande dureté et une grande élasticité, tandis que la trempe le rend au contraire ductile et malléable (1).

131. Le verre trempé acquiert aussi une très-grande dureté, et ce qu'il y a de remarquable, c'est que la dilatation forcée des molécules intérieures n'est maintenue que par la résistance totale de l'enveloppe. L'équilibre existant dans toute la masse, il en résulte que si une portion de la croûte extérieure est détruite, le corps se brise avec explosion ; c'est ce qu'on peut facilement vérifier sur ces petits morceaux de verre qu'on désigne sous le nom de *larmes bataviques*. Ces larmes bataviques se forment en laissant tomber des gouttes de verre dans de l'eau froide. Lorsqu'on brise l'extrémité du fil de verre qui les termine, elles se réduisent instantanément en poussière. C'est pour éviter cette grande fragilité du verre refroidi brusquement, qu'on introduit les ouvrages de

(1) Cet alliage est composé de 78 parties de cuivre et de 22 parties d'étain. C'est M. Darcet qui a découvert les phénomènes singuliers que la trempe et le refroidissement lent y développent.

verre, à mesure qu'ils sont fabriqués, dans un four très-allongé, dont une des extrémités, communiquant avec le four où le verre se trouve en fusion, est à une température très-élevée, et dont l'autre extrémité, communiquant avec l'air par une large ouverture, est à peu près à la température ordinaire : les objets travaillés sont d'abord placés dans la partie la plus chaude du four et retirés lentement vers l'autre extrémité ; le refroidissement ne s'effectuant alors que graduellement et dans plusieurs heures, le verre perd une grande partie de sa fragilité.

132. Plusieurs métaux acquièrent encore de la dureté et de l'élasticité lorsqu'ils sont battus à froid ; on dit alors qu'ils sont écrouis : pour leur rendre leur ductilité on est obligé de les faire recuire de temps en temps, c'est-à-dire de les faire chauffer jusqu'au rouge et de les laisser refroidir lentement : le fer, le cuivre, le platine et plusieurs autres sont dans ce cas. Le fer perd également une partie de sa ductilité en passant à la filière.

Plusieurs métaux, tels que le fer, le cuivre, le platine, perdent complétement leur ductilité lorsqu'on les soumet, pendant quelque minutes, à une température élevée, à l'action d'un courant de gaz ammoniac : le gaz est décomposé, et sans que ces métaux absorbent une quantité pondérable des élémens qui le constituent, ils deviennent cassans et friables. On ignore complétement la cause de ce phénomène singulier.

133. Dans les différens cas que nous venons d'examiner, l'élasticité est principalement produite par la stabilité d'équilibre des positions relatives des molécules ; mais les corps qui sont très-ductiles peuvent, dans certaines circonstances, acquérir une grande élasticité ; elle est due alors à la stabilité d'équilibre par rapport à la distance des centres de gravité ; tels sont, par exemple, des fils de fer et de cuivre tendus et fixés par leur extrémité, qu'on dérange de leur position.

134. En général, les corps, dans les oscillations produites par leur élasticité, n'éprouvent que peu de variations de volume ; il y a cependant des corps qui sont très-poreux et très-élastiques, dont le volume apparent peut éprouver de très-grands changemens ; tels sont les éponges

sèches, le liége, le sureau, etc. : mais comme dans ces corps c'est de l'élasticité de la matière qui compose les parois des nombreuses cellules qu'ils renferment, que dépend l'élasticité de la masse, le volume réel du corps, c'est-à-dire, le lieu occupé par la matière et qui n'est perméable qu'aux fluides impondérables, n'éprouve encore que de faibles changemens de densité.

135. Dans tous les cas, la forme de la masse du corps, la position des points fixes, la direction et l'intensité de la force ont une très-grande influence sur le développement de l'élasticité d'un corps ; car l'amplitude des oscillations d'un corps élastique dépend de la flexion qu'on peut lui faire éprouver sans le déformer d'une manière permanente, ou le briser ; et la flexion peut être d'autant plus grande, que les dimensions du corps sont plus inégales, que la force est appliquée à une plus grande distance des points fixes, et, enfin, que les dimensions du corps, parallèles à la force, sont plus petites relativement à celle qui lui est perpendiculaire : ainsi, les plaques sont plus flexibles que les masses dont les dimensions diffèrent peu ; et les lames très-allongées, les fils sont plus flexibles encôre ; la raison en est évidente : lorsqu'un corps est courbé, les molécules sont d'autant plus écartées les unes des autres, qu'elles sont plus éloignées de la surface concave ; par conséquent, pour une courbure donnée il y a toujours une épaisseur à laquelle elles seraient trop écartées pour conserver de l'adhérence.

La force élastique des corps a de nombreuses applications ; c'est au moyen de la force élastique développée dans un fil par la torsion que Cavendish est parvenu à découvrir que les corps s'attirent et à mesurer la densité de la terre. C'est encore au moyen de cet appareil que Coulomb est parvenu à déterminer les lois des attractions et des répulsions électriques et magnétiques ; plus tard nous verrons que c'est l'élasticité qui produit et propage les sons ; enfin, dans les arts on emploie la force élastique des corps dans un grand nombre de circonstances.

136. *Ductilité.* Lorsque les molécules sont terminées par un grand nombre de faces, ou lorsque leur distance est assez considérable pour que l'in-

fluence de leur figure soit détruite en partie, les positions d'équilibre stable sont plus voisines, l'élasticité devient très-petite, et les masses soumises à des forces plus ou moins considérables, peuvent facilement changer de forme.

137. Les corps sont quelquefois si ductiles qu'ils cèdent à la plus petite pression; tels sont la cire, l'argile, etc.; d'autres fois les corps changent de forme par des forces très-énergiques, tels sont un grand nombre de métaux dont les masses ne peuvent fléchir que par des percussions subites et réitérées, ou sous la pression continue du laminoir (1), ou enfin en passant à la filière (2). L'ordre suivant lequel les corps ductiles se prêtent à l'action du marteau, du laminoir et de la filière, n'est point le même. La facilité avec laquelle les corps passent au laminoir dépend de la ductilité et de la densité; la facilité de passer à la filière dépend de la ductilité et de la ténacité.

138. En général la ductilité augmente avec la température, parce qu'à mesure que les molécules s'éloignent davantage, l'influence des formes diminue. Ainsi, la plupart des résines sont ductiles à des températures plus ou moins élevées, et cassantes à de basses températures; ainsi, la plupart des métaux acquièrent par la chaleur une plus grande ductilité, et se travaillent alors avec une plus grande facilité. Il y a cependant quelques exceptions : le cuivre se forge plus difficilement à chaud qu'à froid, et le plomb et l'étain, qui sont très-ductiles à froid, se brisent sous le marteau, à une température peu éloignée de leur fusion.

---

(1) Un laminoir est un appareil composé de deux cylindres d'acier, dont les axes sont parallèles; ces cylindres se meuvent en sens contraire par un système d'engrenage mu par une manivelle, et la distance qui les sépare peut être augmentée ou diminuée par des vis de rappel; mais une fois fixés, les axes des cylindres sont retenus dans leur position par une force très-considérable. C'est entre les deux cylindres en mouvement qu'on engage dans le sens de leur rotation la masse métallique qui doit être laminée : la pression successive et continue qu'elle éprouve, augmente les dimensions parallèles aux axes des cylindres; on répète cette opération en diminuant à mesure la distance des cylindres, et on parvient ainsi à réduire les métaux en lames d'une très-petite épaisseur.

(2) Les filières sont des plaques d'acier trempé, percées d'un grand nombre de petits trous coniques, de dimensions décroissantes; on engage dans un des trous et par une de ses extrémités la masse métallique qu'on veut réduire en fil; on la tire par de fortes tenailles; en faisant passer de nouveau le cylindre dans des trous d'un plus petit diamètre, on parvient à le réduire au degré de finesse qu'on désire.

139. *Fragilité.* Les corps élastiques sont en général cassans, car la fragilité dépend de l'élasticité. En effet, lorsque les positions d'équilibre stable sont trop éloignées pour que les molécules puissent passer de l'une à l'autre, la distance des centres de gravité des molécules éprouve de grandes variations, et cette distance étant la plus grande possible lorsque les molécules sont dans la position d'équilibre instantané, il en résulte qu'à cet instant la force qui retient les molécules les unes avec les autres est très-petite, et, par conséquent, facile à détruire.

140. *Résistance au choc.* Lorsqu'un corps quelconque éprouve une percussion subite, les molécules frappées tendent à changer de place ; si le corps est ductile, elles se déplacent, et réagissant sur celles qui les environnent, elles les déplacent à leur tour. Mais si le corps est élastique, et si la percussion écarte les molécules au delà des limites de l'élasticité, le corps se brise, et les circonstances qui accompagnent ce phénomène dépendent non-seulement de la nature du corps et de sa structure, mais encore de sa forme, de sa masse, des points d'appui, du point d'application, de l'intensité et de la direction de la force. Comme un corps ne se brise qu'après avoir fléchi, et comme la flexion exige toujours pour se manifester un certain temps, à la vérité très-petit, mais pourtant appréciable, il en résulte une explication très-simple d'un phénomène remarquable produit par le choc des projectiles.

Lorsqu'un corps lancé avec une certaine force, rencontre un corps d'une grande surface, fixé par ses extrémités, mince et élastique, si la force du projectile est assez grande pour le courber au delà des limites de son élasticité, et si sa vitesse n'est pas trop grande, le corps élastique sera brisé dans une grande étendue ; mais si la vitesse du projectile est trop rapide de manière que la partie choquée ne résiste pas assez pour donner à la masse le temps de fléchir, le projectile ne brise le corps que sur son passage ; c'est ainsi, par exemple, qu'un boulet de canon à demi-portée traverse un navire en ne faisant qu'une très-petite ouverture ; tandis que, à une distance plus considérable, sa vitesse étant plus petite, il déchire les flancs du navire sur une surface plus ou moins étendue. C'est ainsi qu'une balle tirée à une petite distance dans une vitre, la tra-

verse en ne faisant qu'un trou circulaire, et la brise en totalité si la distance est assez considérable pour que sa vitesse soit assez petite à l'instant du choc pour donner à la vitre le temps de fléchir.

141. *Résistance à la pression.* Les effets de la pression sur un corps dépendent de toutes les circonstances que nous avons indiquées pour le choc ; ils dépendent, de plus, de la durée de la pression : nous nous contenterons d'indiquer les principaux résultats qu'on a obtenus par le calcul et qui ont été sensiblement confirmés par l'expérience.

142. La résistance d'un corps posé sur un plan horizontal infiniment résistant, à une pression verticale qui tend à l'écraser, dépend évidemment de la nature des corps ; mais pour chacun d'eux elle dépend de sa forme. La résistance d'un prisme droit est en raison inverse du carré de sa hauteur, en raison directe de la largeur, c'est-à-dire, de la dimension par laquelle la flexion peut avoir lieu, et en raison directe du carré de l'épaisseur ; un prisme dont la base est un parallélogramme résiste moins qu'un prisme à base carrée de même hauteur et de même volume : sous cette dernière forme un corps résiste moins qu'un cylindre de même hauteur et de même volume ; un cylindre plein résiste moins qu'un cylindre vide de même hauteur et de même masse ; enfin, un cylindre plein résiste moins qu'un cône de même hauteur et équivalent. Un prisme d'une seule pièce résiste plus que s'il est composé de plusieurs pièces séparées. Les corps ne présentent pas la même résistance dans toutes les directions ; ainsi, les pierres résistent mieux lorsqu'elles sont placées dans le sens de leur lit naturel que dans tout autre ; les bois résistent mieux dans la direction de leurs fibres que dans des directions perpendiculaires ;

143. Lorsqu'un corps qui affecte la forme d'un prisme allongé, est fixé horizontalement par une de ses extrémités, il faut, pour produire le maximum d'effet, appliquer la force à l'extrémité libre. On a trouvé, par l'observation, que la résistance de ce prisme est en raison inverse de la longueur, en raison directe de la largeur et du carré de l'épaisseur ; la largeur est la distance des faces parallèles à la direction de la force ; l'épaisseur, celle des faces perpendiculaires. Si un corps est fortement assujetti par ces deux extrémités, la force, pour produire le maximum d'effet,

doit être appliquée vers le milieu : la résistance est alors beaucoup plus considérable que dans le premier cas, elle est à peu près quadruple ; si le corps était seulement soutenu par ses deux extrémités, la résistance serait deux fois plus grande que dans le premier cas. On doit regarder le poids du corps comme une force verticale appliquée à son centre de gravité. On peut toujours donner à un prisme, fixé d'une manière quelconque, des dimensions telles qu'il ne puisse pas résister à son propre poids. Lorsque la résistance du corps n'est pas suffisante pour supporter la pression continue qui agit sur lui, il commence par fléchir, et lorsque la courbure est parvenue à son maximum, il se rompt. Lorsque le corps est assujetti par une de ses extrémités, il se brise près du point d'appui ; lorsqu'il est fixé par ses deux extrémités, il se brise en trois endroits, au milieu et près des points d'appui ; enfin, lorsqu'il est seulement soutenu par ses extrémités, la fracture est unique et se fait au milieu. Tous ces résultats sont susceptibles d'éprouver, dans chaque cas particulier, de grandes variations par le défaut d'homogénéité, et par un grand nombre de circonstances qu'il est impossible de prévoir.

144. *Résistance à la Traction.* La résistance que les corps opposent à deux forces qui agissent en sens contraire, et qui tendent à l'allonger ou à le déchirer, porte le nom de Ténacité : la ténacité paraît dépendre principalement de la cohésion. Pour mesurer la ténacité des corps on les suspend par une extrémité, et on fixe à l'autre une coupe de balance, qu'on charge progressivement de poids jusqu'à ce que l'adhérence des corps soit détruite. On a trouvé par l'expérience que la résistance d'un corps prismatique était sensiblement indépendante de sa longueur, et qu'elle était proportionnelle à la surface de la section perpendiculaire à la direction des forces. Les corps composés de fibres parallèles résistent beaucoup plus dans leur direction que dans toute autre. Les métaux travaillés, forgés ou passés à la filière, ont une bien plus grande ténacité que lorsqu'ils ont été fondus ; la ténacité des métaux diminue à mesure que la température augmente.

145. *Résistance à être entamé, rayé ou usé par un autre corps.* On désigne sous le nom de Dureté la résistance des corps à être entamés, rayés ou usés

par d'autres corps. Il est extrêmement difficile de déterminer la dureté relative des corps ; car, la résistance des corps à être rayés dépend de la nature de la pointe dont on se sert ; si elle est naturelle, comme l'angle d'un cristal, les résultats sont différens de ceux qu'on obtiendrait avec des pointes artificielles, comme celles qui proviennent d'une cassure, et dans l'un et l'autre cas les résultats varient encore avec la forme de la pointe et la direction de son mouvement ; de plus, la faculté de rayer et d'user ne dépendent pas l'une de l'autre ; car, il existe des corps qui en rayent d'autres, mais ne les usent pas, et, au contraire, sont usés par eux ; ainsi, par exemple, la pierre ponce est rayée par le verre, et ne le raye point, tandis que le verre est usé par la ponce, et ne l'use point.

146. Il paraît que la dureté dépend à la fois de la cohésion et de l'élasticité : du moins dans chaque corps la dureté éprouve les mêmes variations que la force élastique et la cohésion ; ainsi, les métaux écrouis sont plus durs que les métaux fondus ou recuits. La dureté diminue à mesure que la température augmente ; la fonte qui, à froid, est d'une très-grande dureté, à la chaleur rouge, se laisse entamer avec la plus grande facilité par la scie. On emploie ce procédé en grand pour diviser des blocs de fonte.

§ IV.

Structure des Corps solides.

147. Les corps inorganiques qui constituent la charpente du globe, et ceux que nous formons artificiellement, se présentent ordinairement sous des formes irrégulières, composées de parties réunies d'une manière confuse. Cependant ces corps offrent souvent des indices d'une structure régulière, tels sont les corps composés de lames parallèles ou inclinées, de fibres parallèles ou groupées autour d'un point central ; enfin, ces corps se présentent quelquefois sous des formes régulières terminées par des faces planes ; c'est à ces corps réguliers qu'on a donné le nom de Cristaux.

Quoique les cristaux ne forment qu'une très-petite portion de la masse des corps

solides qui existent, il paraît cependant que tous les corps peuvent cristalliser, et que les formes plus ou moins irrégulières qu'ils affectent ordinairement sont dues à des causes perturbatrices qui ont agi pendant leur formation ; c'est pourquoi nous allons commencer par développer la théorie de la structure des cristaux. Nous examinerons ensuite les circonstances nécessaires à leur formation, et nous pourrons alors connaître les causes qui altèrent leurs formes et produisent ces masses qui ne renferment que des indices de cristallisation, ou qui sont tout-à-fait confuses.

A. *Structure des Cristaux.*

148. On connaît depuis long-temps, et la forme régulière des cristaux, et la similitude de ceux qui appartiennent à une même cristallisation, et le grand nombre de formes sous lesquelles une même substance peut se présenter ; mais c'est seulement depuis une trentaine d'années que Haüy, conduit par une série d'expériences à des inductions nécessaires ou probables, est parvenu à établir une théorie de la cristallisation, qui non-seulement s'accorde parfaitement avec les faits observés, mais encore en a fait prévoir un grand nombre ; c'est cette théorie que nous allons exposer.

149. *Division mécanique. Formes primitives.* Tous les cristaux de la nature, et ceux qui sont les produits de l'art, se prêtent plus ou moins à une division mécanique qui ne peut jamais s'effectuer de manière à donner des faces lisses et brillantes que parallélement à un certain nombre de plans (1). Lorsqu'on effectue cette division mécanique, on parvient toujours, après avoir enlevé un certain nombre de lames parallèles, à obtenir un petit corps dont la forme est toujours la même pour tous les cristaux appartenant à une même espèce, c'est-à-dire, qui sont composés des mêmes élémens chimiques, quelle que soit, d'ailleurs, la diversité de leurs figures. Le résultat de la division mécanique porte le nom de Noyau ou de Forme Primitive, et le cristal dans lequel il est engagé porte celui de Forme Secondaire. La figure 48 représente les différentes époques de la division mécanique d'un cristal secondaire de chaux carbonatée ; les figures 49 et 50 représentent deux formes secondaires, l'une de chaux carbonatée, l'autre de chaux fluatée, avec la position de leurs noyaux.

Les formes primitives obtenues jusqu'ici sont au nombre de six, savoir : le parallélipipède, qui renferme le cube comme cas particulier (*fig.* 51), le prisme exaèdre régulier (*fig.* 52), le dodécaèdre rhomboïdal (*fig.* 53), la pyramide triangulaire

(1) Tous les corps ne se prêtent pas également à cette division, mais ceux qui s'y refusent présentent toujours dans leur cassure des reflets qui permettent de reconnaître la direction des joints naturels.

régulière (*fig.* 54), et enfin, l'octaèdre (*fig.* 55), dont les faces sont toujours parallèles, 2 à 2.

150. *Molécules.* Lorsqu'après avoir obtenu le noyau d'un cristal quelconque, on continue la division mécanique, cette division ne pouvant s'effectuer que parallèlement aux faces qui le terminent, on obtiendra toujours des corps semblables. Mais si l'on conçoit la forme primitive divisée par des séries de plans équidistans et parallèles aux faces, il est évident que, dans cette division idéale, les plans pouvant être aussi rapprochés qu'on voudra, diviseront le cristal en un très-grand nombre de petits solides en général tous égaux entre eux, et qu'à la limite du rapprochement des plans, ces petits solides seront précisément les molécules élémentaires du cristal. Nous disons en général, car lorsque la forme primitive est un octaèdre ou un tétraèdre, on obtient deux sortes de solides élémentaires, des tétraèdres et des octaèdres; et comme les molécules ne peuvent avoir qu'une seule forme, il faut opter entre les deux que donne la division mécanique : Haüy a choisi la plus simple, qui est le tétraèdre.

151. Les molécules obtenues directement ou adoptées par Haüy, sont : le parallélipipède (*fig.* 56), le prisme triangulaire (*fig.* 57), et le tétraèdre (*fig.* 58). En effet, le parallelipipède primitif a évidemment pour molécule intégrante des parallélipipèdes semblables (*fig.* 59). Le prisme exaèdre régulier a pour molécules des primes triangulaires (*fig.* 60) qui, réunis deux à deux, forment des parallélipipèdes (*fig.* 69). Le dodécaèdre rhomboïdal a pour molécules des tétraèdres isocèles; car, toutes les arètes et toutes les diagonales des faces qui le terminent étant parallèles à deux faces opposées, les plans de divisions passeront par les arètes et les diagonales, et, par conséquent, les solides élémentaires seront terminés par des triangles. Ces pyramides réunies 6 à 6 autour d'un point O (*fig.* 70) forment des parallélipipèdes.

La pyramide triangulaire donne à la fois des pyramides triangulaires et des octaèdres; la figure 62 représente la division de la pyramide triangulaire par des plans également distans de chaque face et de l'angle opposé; il résulte de cette division un octaèdre A B C D E F, et 4 pyramides P, Q, R, S.

L'octaèdre donne encore pour produit de la division mécanique, des pyramides triangulaires et des octaèdres : la figure 63 représente la division d'un octaèdre par des plans également distans des faces opposées parallèles; cette division donne 6 octaèdres et 8 pyramides triangulaires; les octaèdres occupent les angles de la forme primitive, et les tétraèdres ont leurs sommets au centre. On conçoit, d'après cela, que la division mécanique par des plans parallèles aux faces, quelque rapprochés qu'ils soient d'ailleurs, donnera toujours pour la pyramide triangulaire et pour l'octaèdre, des solides élémentaires de l'une et de l'autre de ces formes.

Dans chaque cas particulier, lorsqu'on connaîtra les angles des faces de la forme primitive, il sera facile d'en déduire l'inclinaison des faces des molécules; il ne res-

tera plus alors, pour connaître exactement leurs formes, qu'à trouver le rapport de leurs dimensions : nous verrons bientôt par quels moyens on peut y parvenir.

152. *Disposition des molécules dans les formes primitives.* La division mécanique des formes primitives qui a conduit à reconnaître les derniers élémens des cristaux, indique d'elle-même de quelle manière les molécules y sont disposées. Dans les parallélipipèdes primitifs, les molécules sont placées les unes à côté des autres, et sont réunies par des faces symétriques (*fig.* 59). Dans le prisme exaèdre primitif, les molécules se groupent deux à deux (*fig.* 69), et forment des parallélipidèdes qui, réunis autour d'une arète commune au nombre de 3, forment le prisme exaèdre. Dans le dodécaèdre rhomboïdal, les molécules sont des pyramides triangulaires qui, réunies au nombre de 6, forment des parallélipipèdes (*fig.* 70) : ces derniers, groupés autour d'un point au nombre de 4, forment alors le dodécaèdre (*fig.* 61). Dans la pyramide triangulaire et l'octaèdre primitif, les molécules sont encore des tétraèdres réunis par leurs sommets de manière à laisser entre eux des espaces qui ont la forme octaèdre.

153. *Disposition des molécules autour des formes primitives.* En effectuant la division mécanique d'une forme secondaire de manière à enlever successivement des lames très-minces dans toutes les directions possibles, on remarque que les joints naturels partent toujours d'une arète ou d'un angle, et que les lames enlevées successivement vont en augmentant de dimensions ; c'est ce qu'il est facile de reconnaître sur la division mécanique du dodécaèdre pentagonal et du dodécaèdre rhomboïdal, qui est représentée dans les figures 64 et 65. Or, les joints naturels parallèles aux faces de la forme primitive, indiquent que la matière qui enveloppe les formes primitives est composée de lames parallèles, appliquées les unes sur les autres, et les variations de dimensions de ces lames indiquent qu'elles vont en décroissant. Pour expliquer ces décroissemens, et afin de pouvoir les soumettre au calcul, Haüy regarde ces lames superposées comme composées de parallélipipèdes qu'il appelle molécules soustractives ; alors il explique le décroissement successif des lames, en supprimant des rangées de molécules, tantôt parallèlement au bord, tantôt parallèlement aux diagonales des faces, tantôt suivant des lignes inclinées et aux bords et aux diagonales ; c'est ce que ce savant physicien désigne sous les noms de décroissemens sur les bords, décroissemens sur les angles, et décroissemens intermédiaires ; la figure 66 représente la structure du dodécaèdre pentagonal : le décroissement a lieu sur un des bords par une molécule en largeur, et deux en hauteur, et sur un autre, par deux molécules en largeur et une seule en hauteur ; la figure 67 représente la structure du dodécaèdre rhomboïdal secondaire ; le décroissement à lieu par une rangée sur tous les bords ; la figure 68 représente un décroissement sur un angle.

Dans ces différentes espèces de décroissemens les rangées soustraites dans chaque lame n'étant jamais nombreuses, et ces lames ne comprenant jamais dans leur

épaisseur qu'un petit nombre de molécules, les retraits de chacune ne seront point visibles (1), et ces décroissemens donneront lieu à des faces planes, qui partiront des bords ou des angles; et comme ces faces secondaires pourront être inclinées d'un grand nombre de manières différentes sur les faces primitives où elles ont pris naissance, et comme d'ailleurs de nouveaux décroissemens peuvent succéder aux premiers, il en résulte que la matière qui enveloppe les formes primitives pourra prendre un grand nombre de formes différentes, et, par conséquent, que le nombre des formes secondaires d'une même substance n'a point de limites.

154. Quant aux molécules soustractives, lorsque les molécules intégrantes sont des parallélipipèdes, elles sont elles-mêmes molécules soustractives; lorsque les molécules intégrantes sont des prismes triangulaires, la molécule soustractive est formée de deux d'entre elles, réunies par des faces identiques (*fig.* 69); lorsque les molécules intégrantes sont des pyramides triangulaires qui ne sont pas régulières et qui, réunies en un certain nombre, peuvent former des parallélipipèdes, ces parallélipipèdes constituent les molécules soustractives: c'est ce qui a lieu pour tous les corps dont la forme primitive est un dodécaèdre rhomboïdal: la molécule est formée de 6 pyramides (*fig.* 70); mais dans tous les autres cas où la forme primitive est un tétraèdre ou un octaèdre, la molécule soustractive est formée d'un octaèdre A B C D E F (*fig.* 71) réuni à deux pyramides triangulaires G A C D et H B E F, et chacun de ces solides est formé par des molécules tétraèdres séparées par des intervalles octaèdres (*fig.* 62 et 63). Dans tous les cas l'inclinaison des faces de la molécule soustractive et ses dimensions relatives sont liés à celles de la forme primitive, et peuvent s'en déduire facilement.

155. *Applications de cette théorie.* Lorsqu'un cristal secondaire est donné, la division mécanique conduit à la forme primitive, dont on peut facilement mesurer les angles: si ces angles sont égaux à ceux qui appartiennent au solide régulier de même forme, la forme primitive est régulière, quelle que soit d'ailleurs l'inégalité de ses dimensions apparentes; mais si ce corps n'est point régulier, il faut déterminer le rapport de ses trois dimensions: on y parvient en déterminant les formes des molécules soustractives et en fixant leurs dimensions relatives de manière à ce que les faces des cristaux secondaires résultent de décroissemens en hauteur et en largeur par des nombres entiers de molécules; c'est à quoi l'on parvient en calculant les angles formés par

(1) Cependant, dans la plupart des cristaux les faces secondaires sont striées dans le sens des décroissemens; ce qui n'arrive jamais aux faces parallèles à celles de la forme primitive. Il y a même des cristaux dans lesquels les retraits des lames décroissantes sont visibles, tels sont certaines variétés de grenat et de fer sulfuré qui laissent dans la plus grande évidence le mécanisme de leur structure.

(2) La nature des décroissemens est indiquée par la division mécanique; car il est toujours facile de voir si les bords des lames enlevées sont parallèles aux côtés de la forme primitive, aux diagonales de ses faces, ou, enfin, s'ils sont inclinés à l'une et à l'autre de ces directions, c'est-à-dire, si ces faces proviennent d'un décroissement sur les bords, sur les angles, ou d'un décroissement intermédiaire.

les faces provenant des décroissemens indiqués par la structure du cristal (2), et en modifiant la valeur du décroissement ou les dimensions relatives des molécules, jusqu'à ce que ses angles coïncident avec ceux des faces secondaires du cristal, qu'on peut observer directement. Quelquefois on peut reconnaître les dimensions qui sont égales au moyen d'une loi très-générale, découverte par Haüy et qu'il a désignée sous le nom de Loi de Symétrie : elle consiste en ce que toutes les parties identiques ou symétriques d'une forme primitive éprouvent les mêmes décroissemens ; de sorte que la symétrie qui existe dans les formes primitives se reproduit encore dans les formes secondaires. L'inégalité des faces est encore indiquée par la division mécanique ; car cette division s'effectue plus difficilement parallèlement aux faces les plus étendues.

Haüy est parvenu, par les moyens que nous venons d'indiquer, à déterminer les formes primitives de toutes les substances minérales, et à représenter non-seulement toutes les formes secondaires connues par des décroissemens qui, dans tous les cas, ne s'élèvent jamais au delà d'un très-petit nombre de molécules, mais encore ce savant physicien est souvent parvenu à prévoir l'existence de formes secondaires, qui n'ont été découvertes qu'après. Haüy, par cette théorie, a créé une nouvelle science, désignée sous le nom de *Cristallographie*, qui embrasse tous les corps inorganiques cristallisés, établit entre eux des relations simples, indiquées par leur structure. Ces belles découvertes ont changé la face de la minéralogie, car elles ont permis de donner aux espèces des définitions suffisantes : ce qui n'était pas possible au moyen des propriétés physiques et de la composition chimique.

156. *Observations.* Le système de cristallisation que nous venons d'exposer représente bien tous les résultats de l'observation, et s'il n'est point celui de la nature, on peut affirmer que par lui elle serait parvenue au même but. Cependant le physicien ne doit point s'arrêter là ; car il ne suffit pas d'expliquer les phénomènes, il faut encore examiner jusqu'à quel point les faits d'où l'on a déduit ces explications sont d'accord avec les autres faits de même genre.

La structure des cristaux dont les molécules sont des parallélipipèdes ne présente rien qui ne soit parfaitement d'accord avec les notions que nous avons sur les forces qui déterminent l'agrégation des molécules ; et nous verrons bientôt que les forces qui se développent pendant la formation des cristaux, expliquent d'une manière satisfaisante les différens phénomènes de leur structure ; mais il n'en est pas ainsi de la structure des cristaux dont la molécule, d'après Haüy, affecte la forme d'un prisme triangulaire ou d'un tétraèdre ; car, dans ces différens cas, il faut admettre que les molécules se réunissent d'abord d'une certaine manière pour former les noyaux, et lorsque ceux-ci sont parvenus à une certaine grosseur, que les molécules se réunissent par groupes, de manière à former des parallélipipèdes égaux qui constituent les molécules soustractives, et dans le cas où les molécules sont des tétraè-

dres qui en se réunissant par leurs faces ne peuvent pas former des parallélipipèdes, ce qui arrive toujours lorsque la forme primitive est un octaèdre ou un tétraèdre, il faut admettre que les molécules se réunissent d'abord par leurs sommets de manière à former des tétraèdres égaux; qu'en même temps d'autres molécules se réunissent aussi par leurs sommets de manière à faire des octaèdres égaux entre eux, et dont les faces sont égales à celles des pyramides, et enfin que deux des pyramides s'appliquent (*fig.* 71) sur les faces opposées d'un octaèdre pour former la molécule soustractive. Cette complication contraste singulièrement avec la simplicité de la formation des cristaux à molécules parallélipipèdes; et d'ailleurs, dans le cas où la forme primitive est un octaèdre ou un tétraèdre, les molécules intégrantes, pour former les molécules soustractives, sont réunies seulement par leurs sommets : ce qui paraît être en opposition avec la nature des forces qui sollicitent les molécules des corps.

Toutes ces difficultés paraissent provenir uniquement de ce que, dans la division mécanique des formes primitives, on n'a point observé que les molécules des corps ne se touchent jamais, et, par conséquent, que, si par les faces latérales des molécules, on menait des plans, les formes primitives seraient divisées en plusieurs systèmes d'espaces égaux entre eux, dont un seul appartiendrait aux molécules, et les autres, aux intervalles qui les séparent. Il résulte de là qu'on ne peut être assuré de la forme des molécules que dans le cas où tous les systèmes de solides obtenus par la division de la forme primitive sont des figures semblables, c'est-à-dire, lorsque la forme primitive est un parallélipipède. Or, comme dans tous les cas il faut nécessairement en venir à grouper les molécules de manière à former les parallélipipèdes qui constituent les molécules soustractives, sans lesquelles il est impossible d'expliquer les formes secondaires, pourquoi ne pas admettre d'abord leur formation? Ces molécules se réuniraient par leurs faces voisines, produiraient des formes primitives qui auraient toutes la forme de parallélipipèdes, et les formes primitives observées seraient toutes des formes secondaires, qui jouiraient, comme les formes primitives réelles, de la propriété d'être divisibles parallèlement à toutes leurs faces. En effet, si les molécules d'un corps sont des prismes triangulaires, ces molécules, réunies au nombre de 2 (*fig.* 69), constitueront un parallélipipède, et ces parallélipipèdes, réunis par les faces symétriques, donneront un solide de même forme et dont les dimensions pourront être plus ou moins considérables : si alors on conçoit que sur les arètes *a b c d* (*fig.* 72) il se fasse un décroissement par une rangée, les faces secondaires qui se développeront seront parallèles au plan B H, et, par conséquent, la forme secondaire sera un prisme à 6 pans semblable au prisme A B C D E F H : mais ces faces secondaires étant parallèles aux faces de jonction des molécules intégrantes, ce cristal secondaire sera divisible parallèlement à toutes ses faces; par conséquent, il jouira de toutes les propriétés caractéristiques des for-

mes primitives d'Haüy. Lorsque les molécules sont des pyramides triangulaires qui, réunies au nombre de 6, peuvent former des parallélipipèdes, en admettant que ces parallélipipèdes se forment d'abord et se réunissent ensuite par les faces symétriques, la forme primitive sera encore un parallélipipède (*fig.* 73); et en supposant qu'il se fasse ensuite des décroissemens par une rangée sur tous les bords aigus *a b*, *b c*, *c d*, *d e*, *e f*, *f a*, il se formera 6 nouvelles faces parallèles à ces bords, et le solide secondaire sera semblable au dodécaèdre indiqué dans la figure dont les faces latérales ont été obtenues en menant des plans parallèles aux faces qui résulteraient des décroissemens. Or, ce dodécaèdre serait encore parfaitement identique avec le dodécaèdre primitif d'Haüy, puisque 6 de ses faces étant parallèles aux faces des parallélipipèdes primitifs, et les 6 autres étant parallèles aux faces de jonction des molécules, cette forme secondaire serait encore divisible parallélement à toutes les faces.

Dans le cas où la forme primitive est un octaèdre, il me paraît infiniment probable que les molécules ont la même forme. En effet, jusqu'ici tous les phénomènes de la structure des cristaux s'expliquent parfaitement bien lorsque les molécules sont des parallélipipèdes ou peuvent en former par la réunion d'un certain nombre d'entre elles; mais on conçoit que tout se passerait encore de la même manière si les molécules n'étaient pas des parallélipipèdes complets; si, par exemple, les sommets aigus manquaient (*fig.* 74): seulement dans les cristaux provenant de la réunion de ces parallélipipèdes tronqués, il y aurait entre les molécules des intervalles vides tétraèdres, qui seraient compris entre des plans parallèles aux faces *m* et *n*, et qui, par conséquent, établiraient une division mécanique dans cette direction. Or, les variétés de l'octaèdre, qu'on rencontre dans la nature, ayant toujours les faces opposées parallèles, renferment toujours les faces d'un parallélipipède, et on peut les considérer comme des parallélipipèdes dont on a enlevé les deux sommets aigus A et B (*fig.* 71) par des plans passant par les diagonales des faces adjacentes. On conçoit d'après cela que des molécules octaèdres peuvent, en se réunissant, donner des formes primitives parallélipipèdes, et si on suppose qu'il se fasse sur les angles G et H des décroissemens par une rangée, les faces secondaires seront parallèles aux faces *m*, *n*, et la forme secondaire sera un octaèdre divisible parallélement à toutes les faces, puisque toutes seront parallèles aux faces des molécules. Enfin, lorsque la forme primitive apparente est un tétraèdre, si on suppose que la molécule soit encore un octaèdre, la forme primitive réelle sera encore un parallélipipède, et, en admettant qu'un décroissement sur les angles aigus ait produit un octaèdre secondaire, et que les quatre faces latérales A, B, C, D (*fig.* 75) aient pris un accroissement plus considérable que les autres, on obtiendra évidemment un tétraèdre qui sera divisible parallélement à toutes les faces. Cette

dernière hypothèse ne présente rien qui ne soit très-ordinaire ; on rencontre bien souvent des cristaux dont certaines faces ont reçu un si grand accroissement, relativement aux autres, que leur forme paraît entièrement changée.

En résumant ce qui précède, il paraît probable que les corps ne peuvent former des cristaux qu'autant que leurs molécules sont des parallélipipèdes ou qu'elles peuvent en produire en se réunissant par leurs faces, ou, enfin, qu'elles renferment toutes les faces des parallélipipèdes ; que dans tous les cas, les formes primitives sont des parallélipipèdes, et que les cristaux regardés comme primitifs par Haüy, sont des formes secondaires qui jouissent de la propriété d'être divisibles parallèlement à toutes les faces, parce que toutes sont parallèles à celles des molécules. Cette théorie est plus simple que celle qui a été admise par Haüy, parce qu'elle ramène tous les cas possibles à un seul, qu'elle est exempte de ces exceptions singulières que présente dans la théorie d'Haüy la structure de l'octaèdre primitif et du tétraèdre, qui d'ailleurs ne paraissent pas pouvoir se concilier avec le mode ordinaire d'agrégation des molécules. Au surplus, cette théorie ne change rien aux résultats géométriques obtenus par Haüy, car les molécules soustractives étant les mêmes, les valeurs numériques des décroissemens qui ont lieu sur des faces réellement primitives restent les mêmes, et ceux qui ont été rapportés à des faces qui nous paraissent secondaires, pour être ramenés aux faces primitives, n'éprouveraient que de très-légères modifications.

B. *Cristallisation.*

Les molécules d'un corps ne peuvent se grouper d'une manière régulière qu'autant qu'elles sont libres ; car, c'est alors seulement qu'elles peuvent se réunir par les faces qui s'attirent davantage. Aussi, la cristallisation n'a lieu que quand les molécules sont en dissolution dans un liquide, en fusion ou à l'état de vapeurs.

157. ***Formation des cristaux dans un liquide.*** Considérons un corps quelconque en dissolution dans un liquide : ses molécules, que nous supposerons d'abord des parallélipipèdes, sont sollicitées par deux forces, leur attraction réciproque et l'affinité du liquide ; lorsque ces deux forces sont en équilibre, ou lorsque la dernière l'emporte sur la première, la dissolution est permanente ; mais toutes les fois que l'attraction des molécules est plus forte que l'affinité du liquide, les molécules se réunissent et la cristallisation a lieu. On rend l'attraction des molécules dominante, 1° en saturant le liquide à chaud et en laissant refroidir la dissolution ; car, en général, la faculté dissolvante d'un liquide diminue avec sa température (1) ; 2° en abandonnant la dissolu-

(1) Nous disons en général, car il est des sels qui ne sont pas sensiblement plus solubles à chaud qu'à froid ; tel est, par exemple, le sel marin : il en est même qui le sont moins.

tion à l'air atmosphérique ; l'évaporation lente, diminuant continuellement la masse du liquide, produit une diminution correspondante dans la quantité de matière solide qui peut être tenue en dissolution. Dans tous les cas, la cristallisation ne commence pas exactement au point de saturation : presque toujours la concentration dépasse ce terme, mais alors la présence d'un fragment du corps tenu en dissolution, ou un mouvement vibratoire de la dissolution, détermine à l'instant la cristallisation. Ces phénomènes sont analogues à celui que présente l'eau qu'on peut amener à l'état liquide, avec certaines précautions, à plusieurs degrés au-dessous du terme ordinaire de sa congélation.

Lorsque les molécules se réunissent, elles doivent le faire par les faces qui s'attirent davantage, et se rapprocher jusqu'à ce que la force élastique de la chaleur soit en équilibre avec l'attraction des molécules. Il est facile de voir que les molécules ne peuvent pas se réunir par des faces identiques (*fig.* 76) ; car en admettant que la force élastique du calorique soit la même sur toute l'étendue des faces, les molécules ne pourront conserver le parallélisme de leurs faces, car, comme nous le verrons bientôt, les angles a, a' s'attirent plus que les angles b, b' ; ainsi les molécules devraient prendre la position indiquée dans la figure 77. Mais si l'on suppose que les molécules se réunissent par des faces symétriques (*fig.* 78), elles pourront conserver leur parallélisme, parce que l'attraction réciproque sera la même sur tous les points des faces voisines. D'ailleurs, dans tous les corps composés, les molécules sont elles-mêmes formées des molécules des corps constituans ; et comme les corps de nature différente, par cela seul que la combinaison existe, ont plus d'attraction que n'en ont les unes pour les autres les molécules constituantes, il en résulte que les molécules doivent se réunir par les faces symétriques : les molécules ainsi réunies constitueront donc une forme primitive semblable aux molécules intégrantes. A l'origine de la cristallisation, c'est l'attraction de chaque molécule sur celle qui est voisine qui produit leur réunion ; mais lorsqu'il s'est déjà formé des masses solides, elles développent une nouvelle force que nous allons examiner. Cette partie de l'attraction des molécules, qu'on désigne sous le nom d'*Affinité*, n'étant sensible, comme nous l'avons déjà dit, qu'à de très-petites distances, on peut concevoir autour de chaque molécule une enveloppe sphérique, dont le rayon serait égal à la distance de l'affinité sensible ; de sorte que toutes les molécules qui seront renfermées dans cette sphère agiront sur la molécule centrale, et toutes celles qui seront au delà ne pourront exercer sur elle aucune attraction appréciable. Cela posé, il est évident qu'une forme primitive exercera sur une molécule encore en dissolution et semblablement placée, une attraction dont l'intensité ira en croissant jusqu'à ce que les dimensions de cette forme primitive aient dépassé la distance de l'affinité sensible, et qui alors restera permanente ; car, jusqu'à

cette limite, la quantité de matière interceptée par la sphère d'affinité sensible de la molécule va en croissant; et au delà, elle reste constante. Lorsque les dimensions de la forme primitive ont dépassé la distance d'affinité sensible, les molécules qui sont suspendues autour d'elle sont inégalement attirées; celles qui sont au centre des faces et à une distance des bords plus grande que la distance de l'affinité sensible, sont également attirées, et le sont plus que toutes les autres; car leur sphère d'attraction sensible intercepte, dans la masse de la forme primitive, des segmens presque hémisphériques (*fig.* 79); tandis que les molécules qui sont plus voisines des bords et surtout des angles (*fig.* 79) n'interceptent, par leur sphère d'affinité sensible, que des segmens moindres qu'une demi-sphère et d'autant plus petits qu'ils sont plus voisins des bords et surtout des angles. Dans le cas où les faces de la forme primitive sont perpendiculaires, le segment intercepté par une molécule placée sur une arête, est le quart de la sphère, et celui intercepté par la sphère de la molécule placée sur un angle trièdre, en est seulement un huitième.

Il est maintenant facile de suivre la marche de la cristallisation. Dès l'origine, l'affinité du liquide va en croissant; car un liquide a d'autant plus d'affinité pour une substance qu'il tient en dissolution, que la quantité en est plus petite. D'un autre côté, l'attraction du cristal formé va aussi en croissant jusqu'à une certaine limite: il en résulte que le cristal grossira en conservant sa forme jusqu'à ce que l'attraction, exercée par l'angle le plus aigu sur la molécule la plus voisine tenue en dissolution, soit égale à l'affinité du liquide sur cette même molécule; mais comme l'affinité du liquide va toujours en croissant, il arrivera une époque à laquelle les molécules ne pourront plus venir se placer sur les angles, ni sur les côtés; alors les lames de superposition éprouveront des retraits par des rangées de molécules parallèles au bord ou aux diagonales; car toutes les molécules également distantes des bords sont également attirées; et comme les décroissemens ne peuvent se faire que par un nombre entier de molécules, un même décroissement se perpétuera sur les lames successives de superposition jusqu'à ce que l'affinité du liquide, qui va toujours en croissant à mesure que la cristallisation fait des progrès, fasse naître un décroissement plus considérable d'une unité. Les décroissemens mixtes, c'est-à-dire, ceux qui ont lieu par des lames dont l'épaisseur est de plusieurs molécules, proviennent de ce que les molécules qui forment les bords d'une première lame décroissante, exercent une attraction plus grande que celles qui sont sur les arêtes de la forme primitive; par conséquent, il pourra arriver que cette différence soit assez grande pour que la seconde lame de superposition ait des dimensions égales à celles de la première; cela pourra même avoir lieu pour un plus grand nombre; mais l'influence du retrait commun de ces lames allant continuellement en s'affaiblissant, il arrivera nécessairement une époque à laquelle une lame devra

éprouver un nouveau décroissement : les lames suivantes auront alors avec elle d'égales dimensions, et lorsqu'elles auront été accumulées en même nombre, il se formera un nouveau décroissement, ainsi de suite. Les décroissemens sur les angles auront lieu lorsque l'attraction du liquide sera plus grande que celle des angles trièdres de la forme primitive, et plus petite que celle des angles dièdres : dans le cas contraire, les décroissemens naîtront sur les côtés. Les décroissemens intermédiaires ont lieu lorsque les angles dièdres adjacens à l'angle plan, sur lesquels les décroissemens doivent commencer, sont très-inégaux ; alors le nombre des molécules soustraites sur le côté adjacent à l'angle dièdre le plus petit est plus considérable que celui de molécules soustraites sur l'autre côté, et, par conséquent, les rangées de molécules soustraites se trouvent inclinées et aux côtés et aux diagonales de la face de superposition. Les décroissemens se feront de la même manière sur toutes les parties identiques ou symétriques de la forme primitive. Les angles et les côtés sur lesquels les premiers décroissemens auront lieu, sont les angles plans et les côtés contigus aux angles solides les plus petits. Lorsqu'une forme secondaire sera formée, elle pourra augmenter de volume sans changer de forme ; car les décroissemens ont eu pour objet d'augmenter tous les angles solides. Les cristaux appartenant à une même cristallisation devront avoir la même forme, parce que les mêmes forces soumises aux mêmes variations auront présidé à leur formation. La forme des cristaux dépendra de la nature du liquide et des substances étrangères qu'il renferme. Les cristaux secondaires, développés sur des formes secondaires éloignées, pourront se croiser de toutes les manières possibles ; mais si des formes primitives s'étaient réunies par des faces identiques, les formes secondaires auxquelles chacune d'elles donnerait naissance se croiseraient nécessairement sous des angles déterminés (1). Les cristaux seront d'autant plus réguliers que la cristallisation sera plus lente ; ils seront d'autant plus volumineux que la masse de liquide sera plus considérable. Les cristaux placés au fond du vase grossiront davantage que ceux qui seront placés vers la surface supérieure, parce que le liquide étant d'autant plus dense qu'il est plus saturé, les couches inférieures seront toujours plus saturées que les couches supérieures, et, par la même raison, dans certaines circonstances les cristaux pourront croître davantage dans le sens horizontal que dans le sens vertical. Enfin, à mesure que la cristallisation sera plus rapide, les cristaux deviendront plus nombreux et plus petits, et formeront des masses dans lesquelles les indices d'une structure régulière iront en s'affaiblissant et finiront par disparaître complétement.

(1) Telles sont, par exemple, plusieurs variétés de staurotide, dont les cristaux se croisent toujours sous un angle de 60 et de 120°; telles sont plusieurs variétés de pyroxène que Haüy appelle Hémitropes, et dont il explique la formation en admettant qu'une des moitiés a fait une demi-révolution sur l'autre.



Tous ces résultats, qui sont des conséquences nécessaires de notre théorie, sont parfaitement d'accord avec l'observation.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que les molécules étaient des parallélipipèdes. Si les molécules étaient des octaèdres, cette figure renfermant toutes les faces du parallélipipède, tout se passerait de la même manière. Si les molécules étaient des prismes triangulaires, les molécules soustractives seraient composées de deux de ces molécules et elles se formeraient sur le cristal même, car les faces par lesquelles elles doivent se réunir pour former des parallélipipèdes, sont celles par lesquelles elles s'attirent davantage. Enfin, si les molécules sont des pyramides triangulaires isolées qui, réunies 6 à 6, puissent former des parallélipipèdes, les molécules soustractives se formeraient encore sur le cristal.

158. *Cristallisation dans un corps en fusion.* Pour faire cristalliser un corps en fusion, on laisse congeler la surface supérieure; on y pratique ensuite une ouverture par laquelle on fait écouler la masse restée liquide; en brisant le vase on trouve ordinairement le dessous de la croûte supérieure et les parois intérieures du vase, lorsque le liquide peut y adhérer, tapissés de cristaux : ce mode de cristallisation réussit très-bien sur le soufre et sur le bismuth purifié. Le soufre cristallise en aiguilles qui ne sont jamais assez nettes pour qu'on puisse en reconnaître la forme; le bismuth, en cubes dont les faces renferment des pyramides quadrangulaires renversées, c'est-à-dire, dont les sommets sont dirigés vers le centre du cube, et les faces de ces pyramides sont formées par des escaliers très-visibles. On aura une idée exacte de ces formes singulières en supposant dans la figure 67 que les pyramides saillantes sont renversées, les bases restant toujours sur les faces du cube; les cristaux présentent alors des décroissemens dans un sens tout-à-fait opposé à ceux qui ont lieu dans la cristallisation par dissolution. Jusqu'ici ce mode de cristallisation n'a été appliqué qu'à un très-petit nombre de corps; rarement on a pu reconnaître la forme des cristaux.

Cependant, dans toutes les masses qui ont été originairement liquides on trouve des indices d'une structure régulière; ainsi, le sulfure d'antimoine est composé de fibres rayonnantes; tous les métaux cassans ont une structure lamellaire, et les métaux ductiles sont composés de petits grains ou de fibres.

159. *Cristallisation par sublimation.* Il arrive quelquefois que des vapeurs en se condensant et passant à l'état solide, cristallisent; mais on ne connaît qu'un très-petit nombre de corps qui soient dans ce cas: ces cristaux ne sont jamais volumineux, et presque jamais assez réguliers pour qu'on puisse en déterminer la forme.

Ainsi, d'après ce qui précède, le premier mode de cristallisation est le seul qui puisse donner des cristaux nettement prononcés, et tous les trois peuvent donner des masses renfermant des indices, plus ou moins marqués, d'une structure ré-

gulière. Il est probable que la nature, dans la formation des masses minérales, n'a pas employé d'autres moyens ; et si nous ne sommes pas parvenus à reproduire dans nos laboratoires tous les corps qui existent dans la nature et toutes les formes sous lesquelles ils se présentent, c'est sans doute parce que nous n'opérons que sur de très-petites masses, parce que le temps, qui a une si grande influence sur les phénomènes dont il est question, est un élément qui n'est point à notre disposition, et enfin, parce que nous ne connaissons pas encore tous les dissolvans que la nature a pu employer.

§ V.

Mouvement des Corps solides.

A. *Mouvement des Corps solides libres.*

160. Lorsqu'un corps solide est soumis à l'action d'un système quelconque de forces, il peut arriver, si ces forces ne sont pas en équilibre, 1° qu'il y ait une résultante unique, c'est-à-dire qu'on puisse remplacer toutes les forces par une seule ; 2° que le système des forces se réduise à deux égales parallèles et opposées.

161. 1° Dans le premier cas, la résultante unique peut être appliquée au centre de gravité ou à tout autre point du corps. Si la force passe par le centre de gravité, on pourra la considérer comme étant la résultante de forces égales et parallèles qui seraient appliquées à chaque molécule du corps ; par conséquent, le corps aura un mouvement de translation dans lequel tous les points décriront des droites parallèles. Mais si la résultante ne passe pas par le centre de gravité, le corps aura un mouvement de translation, le même que si la force était appliquée au centre de gravité, et un mouvement de rotation autour de ce point. En effet, soit M N (*fig.* 80) un corps de forme quelconque sollicité par un système de forces qui se réduisent à la force P appliquée au point A ; soit g son centre de gravité ; au point B, situé sur la ligne A g et à la même distance du point g que le point A, appliquons deux forces opposées Q et R égales à $1/2$ P et parallèles

à la force P ; il est évident que ces forces se détruisant mutuellement, n'altéreront en rien le mouvement du corps. Or, si l'on compose la force Q avec la moitié de la force P, on aura une résultante égale à la force P et qui aura son point d'application au centre de gravité : cette force produira le mouvement de translation ; mais il restera deux forces égales parallèles et opposées, appliquées aux extrémités de la ligne A B. Ce système de forces, qu'on appelle un couple, ne peut point avoir de résultante unique (32), et tend évidemment à produire un mouvement de rotation autour du point *g*.

Lorqu'un corps éprouve ainsi un mouvement de rotation, l'axe, autour duquel se fait sa révolution, sera permanent, c'est-à-dire, conservera sa position dans l'intérieur du corps toutes les fois que les forces centrifuges des molécules du corps se feront mutuellement équilibre ; dans le cas contraire, la position de l'axe de rotation changera continuellement. On démontre en mécanique que, dans un corps de forme quelconque, il y a toujours trois lignes perpendiculaires entre elles, qu'on nomme axes principaux, et autour desquelles les forces centrifuges sont en équilibre ; mais de ces trois axes il n'y en a que deux autour desquels la rotation soit stable, c'est-à-dire, que si une cause étrangère quelconque dérangeait tant soit peu l'axe réel de rotation, il ne tendrait à reprendre sa position initiale qu'autant qu'elle aurait coïncidé avec l'un des deux axes principaux, autour desquels la rotation est stable (1). Les corps de forme irrégulière n'ont, en général, que trois axes principaux ; mais il en est qui en ont une infinité : par exemple, un ellipsoïde de révolution a pour axes principaux son axe de révolution et tous les diamètres de l'équateur ; dans une sphère, tous les diamètres sont des axes principaux.

2°. Lorsque le système des forces qui agissent sur un corps se réduit

(1) Pour chacun des axes principaux, la somme des produits de tous les points matériels, multipliés par le carré de leur distance à cet axe, est un maximum ou un minimum. Ces produits portent le nom de *Momens d'inertie* ; les deux axes stables ont le plus grand et le plus petit moment d'inertie.

à deux forces égales parallèles et opposées, le centre de gravité reste fixe, et le corps tourne autour d'un axe passant par ce point et qui change de position jusqu'à ce qu'il soit parvenu à coïncider avec un des trois axes principaux.

162. Ces résultats du calcul conduisent à une explication très-simple du double mouvement des planètes et des perturbations que quelques-unes éprouvent par leur défaut de sphéricité. En effet, nous avons vu que le mouvement de rotation des planètes autour du soleil résulte de l'attraction permanente et réciproque de ces corps et du soleil, combinée avec une impulsion initiale. Or, si cette impulsion initiale n'a point passé par leur centre de gravité, il aura dû en résulter un mouvement simultané de translation et de rotation autour d'un axe qui aura changé de position, jusqu'à ce qu'il ait coïncidé avec un des axes principaux; alors cet axe de rotation se sera mu dans l'espace parallélement à lui-même. En supposant la terre homogène, son mouvement diurne résulterait de ce que l'impulsion initiale a passé à une distance de son centre égale à la 160e partie de son rayon. Lorsque les corps qui s'attirent sont sphériques, la résultante de leur attraction passe par leur centre de gravité, et, par conséquent, les mouvemens de rotation n'éprouvent aucune altération; mais lorsque les corps ne sont point sphériques, la résultante ne passe plus par ce point dans toutes les positions relatives possibles, et, par conséquent, leur mouvement de rotation pourra être altéré; c'est ce qui arrive pour la terre: les perturbations occasionnées par son aplatissement n'altèrent point la durée du mouvement diurne, ni la position des pôles de la terre; elles changent seulement, par rapport aux étoiles, la position de l'axe et par conséquent le plan de l'équateur, qui alors, dans le mouvement de rotation de la terre autour du soleil, ne se meuvent point parallélement à eux-mêmes. C'est dans ces variations que consistent le phénomène de la nutation de l'axe terrestre et celui de la précession des équinoxes.

B. *Mouvement d'un Corps solide autour d'un point, d'une ligne, ou sur une surface.*

163. Lorsque les forces qui agissent sur un corps se réduisent à deux

égales, parallèles, et agissant dans des sens opposés, c'est-à-dire, à un couple, le corps ne prend qu'un mouvement de rotation autour d'une ligne qui passe par son centre de gravité ; ainsi, le mouvement aurait lieu de la même manière, si le centre de gravité et l'axe de rotation étaient fixes, et, par conséquent, le point ou l'axe fixe n'éprouveraient aucune pression ; mais si le point fixe n'est pas le centre de gravité, ou si l'axe fixe n'est pas l'axe stable de rotation autour duquel le corps tournerait s'il était libre, ce point ou cet axe fixe éprouveront une certaine pression. Il est évident que cette pression existerait encore à plus forte raison, si les forces ne se réduisaient pas à un couple ; car, dans ce cas, si le corps était libre, le centre de gravité aurait un mouvement de translation, et la pression due à ce mouvement serait égale à la résultante de toutes les forces transportées à ce point.

La rotation d'un corps autour d'un point ou d'un axe fixe sont des conceptions purement abstraites, qui ne peuvent pas se réaliser : car, toutes les fois qu'un corps n'est pas libre dans son mouvement, c'est toujours sur la surface d'un autre corps qu'il est assujetti à se mouvoir.

164. Lorsqu'un corps est assujetti à se mouvoir sur la surface d'un autre, le corps mobile éprouve une certaine résistance qu'on nomme Frottement, et le corps fixe une certaine pression.

165. *Frottement.* Dans certains corps le frottement paraît provenir de ce que les aspérités de leurs surfaces pénètrent les unes dans les autres, et ne peuvent se dégager qu'en se déchirant, ou par des ressauts du corps mobile ; cependant, comme le frottement a lieu aussi dans les corps les plus polis, où l'on ne peut pas supposer une semblable pénétration des aspérités, il est probable que le frottement est dû aussi à une certaine adhérence des surfaces qui sont mises en contact.

Pour déterminer les lois du frottement, on se sert d'un appareil (*fig.* 81) composé d'un plan A B mobile autour d'une charnière et dont on peut faire varier à volonté l'inclinaison qu'on mesure sur le cercle divisé C D. Lorsqu'un corps M est placé sur le plan A B, il existe toujours une inclinaison du plan pour laquelle la composante de la pesanteur parallèle au plan A B (79) fait équilibre au frottement ; car, cette composante,

croît à mesure que l'inclinaison du plan A B devient plus grande. On détermine l'angle sous lequel l'équilibre existe en augmentant graduellement l'angle A B C, jusqu'à ce que le corps glisse sur le plan A B, et on prend pour l'angle d'équilibre un angle moindre, mais d'une quantité très-petite : la pesanteur du corps étant représentée par E B, E C représentera la pesanteur décomposée parallélement à A B, c'est-à-dire, le frottement, et la ligne C B la pression (80).

On a trouvé ainsi :

1° Que le frottement n'atteint pas son maximum d'énergie à l'instant du contact, mais seulement au bout d'un certain temps, après lequel il reste constant ;

2° Que le frottement est d'autant plus petit que les surfaces en contact sont mieux polies ;

3° Que le frottement est proportionnel à la pression et ne dépend nullement de l'étendue des surfaces en contact ; de sorte que, si un polyèdre dont les faces seraient très-inégales est posé successivement par chacune d'elles sur le plan incliné A B (*fig.* 81), le corps se mettra toujours en mouvement à la même inclinaison du plan ;

4° Que le frottement est plus grand entre des corps de même nature qu'entre des corps de nature différente ;

5° Que le frottement est beaucoup plus petit quand le contact a lieu successivement entre des parties différentes des surfaces des deux corps, que lorsque le contact à lieu par une même portion de la surface de l'un d'eux, c'est-à-dire, le frottement est plus petit pour un corps qui roule que pour un corps qui glisse. Le frottement d'un corps qui glisse sur un autre se désigne ordinairement sous le nom de Frottement de la *première espèce* ; l'autre s'appelle Frottement de la *seconde espèce* ;

6° Qu'on peut toujours diminuer le frottement en introduisant entre les corps certaines substances, telles que de l'huile, des graisses, du savon, de la plombagine : l'effet des matières solides est probablement dû à ce qu'elles remplissent les inégalités des surfaces en contact, et, par conséquent, qu'elles augmentent le poli ; quant aux substances plus ou moins fluides, il paraît que la grande facilité avec laquelle leurs molécules

peuvent tourner les unes autour des autres, transforme, du moins en partie, le frottement de la première espèce en frottement de la seconde.

Ces résultats de l'observation ont dans les arts de nombreuses applications ; car il n'est point de machines dans lesquelles il ne soit important de diminuer ou d'augmenter le frottement.

C. *Choc des Corps solides.*

Comme les phénomènes du choc varient suivant que les corps sont ductiles ou élastiques, nous examinerons successivement le choc de ces deux espèces de corps.

a. *Choc des Corps ductiles.*

166. *Choc central de deux sphères homogènes.* Lorsque les centres de gravité de deux corps ductiles se meuvent suivant une même ligne droite, après le choc, les corps restent en contact et se meuvent ensemble avec une quantité de mouvement (18) égale à la somme ou à la différence de celles qui les animaient avant le choc ; à la somme, si les mouvemens primitifs étaient dans le même sens ; à la différence, si ces mouvemens étaient en sens contraire.

Si on représente par m et m' les masses des deux corps, par v et v' les vitesses de leurs centres de gravité, les quantités de mouvement, avant le choc, étaient mv et $m'v'$; après le choc, elle sera $mv + m'v'$ si les vitesses initiales étaient dirigées dans le même sens, et $mv - m'v'$ dans le cas contraire : la masse totale étant après le choc $m + m'$, la vitesse commune sera dans le premier cas $\frac{mv + m'v'}{m + m'}$ et $\frac{mv - m'v'}{m + m'}$ dans le second.

Le principe que nous venons de poser peut facilement se déduire du simple raisonnement : en effet, lorsque deux corps ductiles sphériques se meuvent en sens contraire, de manière que leurs centres décrivent la même ligne droite, les deux corps se compriment mutuellement jusqu'à ce que la plus petite quantité de mouvement ait été détruite par la plus grande ; alors les deux sphères ne formeront qu'une même masse, qui aura une quantité de mouvement égale à la différence de

celles des deux corps avant le choc, et, par conséquent, la vitesse après le choc sera égale à la différence des quantités de mouvement primitives divisées par la somme des masses. Si on suppose que les sphères se meuvent dans le même sens, la pression, à l'instant du choc, sera produite par la différence des quantités de mouvement, et elle cessera aussitôt que cette force se sera répartie uniformément dans les deux corps : la masse totale se mouvra donc après le choc dans le même sens, avec une quantité de mouvement égale à la somme de celles des corps avant le choc, et sa vitesse sera égale à cette quantité de mouvement divisée par la somme des masses. Dans le premier cas, il y a, par le choc, une force perdue, égale à la quantité de mouvement la plus petite, parce que les forces sont opposées ; dans le second cas, il n'y a point de perte de force, parce que les corps se mouvant dans le même sens, la pression est uniquement due à l'inertie de la matière. Dans le premier cas, les masses choquées peuvent être réduites au repos ; dans le second, cela ne peut jamais arriver : la vitesse, après le choc, est toujours moyenne entre celles des masses avant le choc.

On peut encore vérifier par des expériences directes les lois du choc des corps ductiles, au moyen de l'appareil que nous allons décrire : A B (82) est un arc de cercle dont le rayon est A O ; il est divisé de chaque côté du point *o*, par lequel passe la verticale du centre O, en degrés qui ne sont point égaux, mais qui sont tels, que si un corps tombait en suivant cet arc de cercle ; arrivé au point *o*, il aurait acquis une vitesse horizontale représentée par le chiffre placé au point de départ (1). Des boules d'argile humides M et N sont suspendues à des

(1) Il suffit, pour déterminer les degrés, de prendre des arcs de cercle dont les cordes soient entre elles comme la série des nombres naturels ; car, si deux corps partent des points *m* et *m'* (*fig.* 83) en suivant les arcs *m o* et *m' o*, les vitesses acquises au point *o* sont les mêmes que si ces corps étaient tombés librement des points *a* et *b* situés à des hauteurs égales à celles des points *m* et *m'* (81). Or, les carrés des vitesses à la fin de la chute sont comme les espaces parcourus ; ainsi, *b o* et *a o* devront être comme les carrés des vitesses ; mais les cordes *o m* et *o m'* sont entre elles comme les racines carrées des lignes *b o* et *a o* ; donc les cordes *o m* et *o m'* devront être proportionnelles aux vitesses.

fils très-déliés fixés au point O; en élevant ces boules à différens degrés du cercle et en les abandonnant à elles-mêmes, elles arrivent au point *o* avec des vitesses représentées par les nombres placés à leur point de départ. Si on élève les masses M et N de chaque côté, la première au degré 8, et la seconde au degré 4, si ces masses sont dans le rapport de 6 à 2, on remarque qu'après le choc les deux sphères s'élèvent ensemble du côté de la masse N, jusqu'au cinquième degré; or, à l'instant du choc, la quantité de mouvement de M était 48, celle de N était 8; la différence de ces quantités, qui est 40, représente la quantité de mouvement de la masse totale: en la divisant par cette masse, qui est 8, on aura la vitesse après le choc, qui sera 5; ce qui est parfaitement d'accord avec l'expérience, car la force nécessaire pour élever une masse au cinquième degré de l'échelle circulaire est égale à la vitesse qu'elle aurait acquise en tombant de cette hauteur (77). Lorsque les masses M et N se meuvent dans le même sens, en partant des mêmes hauteurs que dans l'expérience précédente, on observe, après le choc, que toutes deux réunies s'élèvent au septième degré; or, à l'instant du choc leurs quantités de mouvement étant les mêmes que précédemment, celle de la masse totale, qui est égale à leur somme, sera 56; en la divisant par la masse totale qui est 8, on obtiendra 7 pour la vitesse commune; ce qui est encore parfaitement d'accord avec le résultat de l'expérience (1).

167. *Choc excentrique.* Lorsqu'un corps ductile M (*fig.* 84) vient frapper obliquement une surface plane A B, la force dont il est animé peut se décomposer en deux autres, l'une perpendiculaire au plan A B, l'autre parallèle; or, un corps ne pouvant résister que perpendiculairement à sa surface, la première composante seule sera détruite, et le corps après le choc glissera sur la surface du plan.

Si les centres de gravité de deux corps ne se meuvent pas sur une

(1) Dans ces expériences il faut que le choc ait lieu au point *o*; c'est ce qui arrivera toujours si les corps n'ont que de petits arcs à décrire, et partent en même temps; mais si les arcs sont très-considérables, on pourra toujours par des essais estimer le temps qui doit séparer le départ des deux masses pour que cette condition soit remplie.

même ligne droite, pour déterminer les effets produits par le choc, il faut considérer deux cas différens : 1° celui où les normales (1) aux points de contact passent par les centres de gravité ; 2° celui où cette condition n'a pas lieu. Dans le premier cas, on pourra toujours décomposer les forces qui sont appliquées aux centres de gravité en deux autres dont l'une passera par le point de contact, et dont l'autre lui sera perpendiculaire : l'effet des deux premières se calculera facilement d'après ce qui précède ; car, si les normales sont dans la même direction, les circonstances du choc dû à ces composantes seront les mêmes que celles du choc central, et si les normales sont inclinées, on pourra toujours décomposer la force qui agit suivant une des normales en deux, l'une dirigée suivant l'autre normale, et l'autre qui lui serait perpendiculaire : après quoi, il faudra combiner les forces produites par le choc, avec les composantes auxquelles on n'a point eu égard. Dans le second cas, indépendamment du changement de direction et de vitesse des centres de gravité des deux corps, ils acquerraient en général des mouvemens de rotation.

b. Choc des Corps élastiques.

168. Lorsqu'un corps élastique rencontre un obstacle fixe, il se comprime d'abord jusqu'à ce qu'il ait perdu complétement sa vitesse ; ensuite sa force élastique lui restitue sa forme et sa vitesse initiale, mais en sens contraire.

169. *Choc central.* Lorsque les centres de gravité de deux corps élastiques se meuvent sur une même ligne droite, après le choc, la vitesse de chacune des masses est égale à la vitesse qu'elle aurait acquise, si les deux corps avaient été ductiles, diminuée de la vitesse perdue, ou augmentée de la vitesse gagnée.

Si on représente les masses par m et m', les vitesses initiales par v et v', les vitesses après le choc par V et V', et, enfin, par u la vitesse commune si les corps étaient ductiles, en regardant comme positive la vitesse dans le sens du mouvement de m, on aura, les masses se mouvant dans le même sens,

(1) La normale d'un point d'une surface est la perpendiculaire au plan tangent qui passe par ce point

$V = u - (v - u) = 2u - v$, et $V' = u + (u - v') = 2u - v'$; et comme (166) $u = \frac{mv + m'v'}{m + m'}$
Il viendra

$$V = \frac{(m - m')v + 2m'v'}{m + m'} \text{ et } V' = \frac{(m' - m)v' + 2mv}{m + m}$$

C'est ce que nous allons démontrer par le raisonnement et vérifier ensuite par l'expérience.

Le premier effet du choc de deux corps élastiques est de les comprimer, et cette compression aura lieu jusqu'à ce que la différence de vitesse s'étant également répartie dans chacun d'eux, leurs vitesses soient devenues égales; à cet instant ils auront donc exactement la vitesse qu'ils auraient acquise, s'ils eussent été simplement compressibles; mais aussitôt que la compression a cessé, la force élastique de chacun d'eux se développe et lui rend une vitesse proportionnelle à la compression qu'il a éprouvée; or, la pression éprouvée par chacun d'eux est égale à la vitesse qu'il aurait perdue ou gagnée s'il eussent été ductiles; et comme la force élastique restitue une vitesse dans le même sens que la compression, si la compression a diminué la vitesse, l'élasticité la diminuera encore d'autant; si la compression a augmenté la vitesse, l'élasticité l'augmentera encore d'une même quantité. Ainsi on pourrait encore énoncer le principe en question de cette autre manière : la vitesse, après le choc, est égale à la vitesse initiale, diminuée ou augmentée du double de la vitesse qui serait perdue oú gagnée si les corps étaient ductiles.

On peut vérifier ces résultats au moyen de l'appareil (*fig.* 82); mais il faut aux masses d'argile humide substituer des boules d'ivoire.

Si on prend deux masses représentées par 2 et 6, animées par des vitesses dans le même sens, égales à 8 et 4, on observe qu'après le choc elles se meuvent encore dans le même sens, mais la première avec la vitesse 2 et la seconde avec la vitesse 6, et c'est ce qui résulte de la théorie. En effet, si les masses étaient ductiles, la vitesse commune serait 5; par conséquent la première aurait perdu 3; donc sa vitesse, après le développement de la force élastique, sera 5 moins 3 ou 2; de même la seconde aurait gagné 1, et par conséquent sa vitesse deviendra 5 plus 1 ou 6. Si les masses se mouvaient

en sens contraire, l'expérience indique que la vitesse de la première serait rétrograde et égale à 10, celle de la seconde serait aussi rétrograde et égale à 2 : c'est ce qui résulte encore du principe précédent. En effet, si les masses étaient ductiles, la vitesse commune serait 1 dans le sens du mouvement de la seconde ; puisque la quantité de mouvement de la première étant 16 et celle de la seconde 24, là différence est 8, et qu'en divisant par la somme des masses, qui est 8, le quotient 1 donnerait la vitesse commune ; or, la première qui avait 8 de vitesse, en sens contraire, a perdu 9 ; par conséquent, sa vitesse sera 1 plus 9 ou 10 en sens contraire de son mouvement initial ; la seconde, qui avait 4, a perdu 3 ; par conséquent sa vitesse sera aussi rétrograde et égale à 2. Si les deux sphères avaient des masses égales, et si l'une d'elles était en repos, on trouve par l'observation que cette dernière prend, après le choc, la vitesse de la première, et que celle-ci reste en repos ; c'est ce qui résulte encore de théorie : car la vitesse commune après le choc serait, si les corps étaient ductiles, la moitié de la vitesse, avant le choc, de la masse qui était en mouvement : or, cette dernière perdant encore par l'élasticité ce qu'elle a déjà perdu par la pression, est réduite au repos, et l'autre, dont l'élasticité double la vitesse, acquiert celle qu'avait la première avant le choc.

Lorsque plusieurs sphères élastiques égales ont leurs centres placés sur la même ligne droite ou sur le même arc de cercle, si on écarte celle qui est placée à une extrémité et qu'on la fasse arriver sur la série avec une certaine vitesse, celle qui est placée à l'autre extrémité partira avec une vitesse égale, et toutes les autres resteront immobiles ; si on écarte deux boules et qu'elles choquent ensemble la série, les deux boules placées à l'extrémité opposée s'échapperont avec la même vitesse : en général, si un nombre quelconque de sphères viennent ensemble frapper une série de sphères mobiles, elles font partir un égal nombre de sphères placées à l'autre extrémité de la série. Ce phénomène, que l'on peut facilement constater en suspendant des boules à des fils d'égales longueurs et fixés à un même point (*fig.* 86), tient uniquement à ce que les boules ne sont jamais en contact immédiat. En effet, si une sphère en mou-

vement vient en frapper une autre en repos, celle-ci prend toute la vitesse de la première qui devient immobile : si la seconde sphère en rencontre une troisième en repos, elle lui communiquera de même toute sa vitesse et deviendra de nouveau immobile ; et comme cela aura lieu quels que soient le nombre des sphères et la distance qui les sépare, on conçoit facilement que le choc d'une sphère sur une série de sphères égales et en repos, se communique de l'une à l'autre, et, par conséquent, que la dernière seule peut s'échapper : lorsque l'on met en mouvement plusieurs sphères à la fois, elles n'agissent que successivement, et, par conséquent, l'effet total est égal à la somme des effets dus à chacune d'elles. Le temps de la communication du mouvement est très-petit ; il est inappréciable lorsque la série n'est composée que d'un petit nombre de sphères, mais il deviendrait très-sensible si ce nombre était considérable.

170. *Choc excentrique.* Lorsqu'un corps élastique en mouvement rencontre un plan fixe, le corps se réfléchit en faisant l'angle d'incidence égal à l'angle de réflexion. En effet, on peut décomposer la force du corps élastique en deux, l'une perpendiculaire à la surface résistante, l'autre parallèle : la première produira la compression, l'autre n'aura aucune influence sur le choc ; mais l'élasticité restituant la première en sens contraire, il est évident (*fig.* 85) que l'angle de réflexion sera égal à l'angle d'incidence. Si la surface résistante, au lieu d'être une surface plane, était une surface courbe, on pourrait toujours la considérer comme plane au point de contact, et, par conséquent, le choc aurait lieu comme sur un plan tangent passant par le point de contact.

171. Lorsque les centres de gravité des corps élastiques ne se meuvent pas sur la même ligne droite, et lorsque les corps ont une forme quelconque, on détermine les effets du choc de la même manière que pour les corps ductiles. Toutes les fois que les corps seront sphériques, en décomposant les forces suivant les normales qui passent par les points de contact, on obtiendra les pressions dont on conclura la réaction élastique, et, en combinant cette force élastique avec les autres composantes, on obtiendra les forces auxquelles les centres de gravité sont soumis après le choc.

Mais lorsque les normales des points de contact ne passeront point par les centres de gravité, chacun des corps acquerra un mouvement de rotation.

172. Jusqu'ici nous avons supposé que la force élastique ne se développait qu'après que la pression était complétement anéantie par la répartition uniforme de la vitesse ; mais cela n'arrive jamais rigoureusement, car la compression n'est jamais instantanée ; elle dure toujours un temps plus ou moins long, et comme la force élastique commence à se développer à l'origine même de la compression, il s'ensuit que la force élastique a déjà séparé les corps avant que la pression ait produit tout son effet. On conçoit d'après cela que les lois que nous avons établies ne sont applicables qu'à des corps qui se compriment dans un temps très-petit, et que les vitesses après le choc différeront d'autant plus de celles qui seraient déduites des lois précédentes que le corps cédera plus lentement à la pression. Ainsi, par exemple, si dans les dernières expériences, au lieu d'employer des boules d'ivoire dont la compression se fait presque instantanément, on employait des sphères de gomme élastique, les vitesses après le choc seraient beaucoup plus petites que celles qu'on déduirait de la théorie.

C. *Lois du mouvement d'un système de Corps.*

173. *Conservation du mouvement du centre de gravité.* Lorsque des corps en mouvement agissent les uns sur les autres d'une manière quelconque, et ne sont soumis à aucune action étrangère, le centre de gravité du système se meut uniformément en ligne droite, et son mouvement est le même que si tous les corps étant supposés réunis à ce point, toutes les forces qui les animent y étaient immédiatement appliquées, de sorte que la direction et l'intensité de leur résultante sont invariables. Le choc mutuel d'une partie des corps ne change ni la direction, ni la vitesse du centre commun de gravité.

C'est en vertu de ce principe que le système solaire est entraîné vers la constellation d'Hercule avec une force au moins égale à celle du mouvement de la terre dans son orbite.

174. *Conservation des aires.* Dans un système de corps agissant les uns sur les autres, d'une manière quelconque, et sollicités par une force dirigée vers un

point fixe, si de ce point on mène à chacun d'eux des rayons vecteurs, que l'on projette sur un plan invariable passant par ce point, la somme des produits de la masse de chaque corps par l'aire que trace la projection de son rayon vecteur, est proportionnelle aux temps. S'il n'y a pas de point fixe vers lequel le système soit attiré et qu'il ne soit soumis qu'à l'action mutuelle de ses parties, on peut prendre pour origine des rayons vecteurs, un point quelconque; cette loi subsiste encore lorsqu'il survient des changemens brusques.

Ce principe a été reconnu par Képler dans le mouvement des planètes autour du soleil; mais, tel que nous venons de l'énoncer, il est bien plus général que la loi de Képler.

175. *Conservation des forces vives.* On désigne sous le nom de Force Vive d'un système, la somme des produits de la masse de chaque corps par le carré de sa vitesse. Lorsque des corps ne sont soumis à aucune force accélératrice, s'ils n'éprouvent d'autres actions que leurs tractions et pressions mutuelles, la force vive du système reste constante, dans le cas même où plusieurs de ces corps sont assujettis à se mouvoir sur des lignes ou sur des surfaces courbes. Ce principe ne subsiste, s'il y a des chocs, qu'autant que les corps sont parfaitement élastiques; il cesse d'exister si les corps sont soumis à des forces accélératrices, telles que des des frottemens contre des obstacles fixes ou dans des milieux résistans.

Lorsqu'un système de corps est sollicité par des forces accélératrices quelconques, la force vive varie à chaque instant; elle est un maximum toutes les fois que le système passe par une position dans laquelle il serait en équilibre stable, s'il y était placé immédiatement sans vitesse acquise; elle est, au contraire, un minimum toutes les fois qu'il passe par une position d'équilibre instantané.

176. *Principe de la moindre action.* Dans un système de corps dont les variations se font par des nuances insensibles, quelle que soit d'ailleurs la nature des forces qui les sollicitent, la somme des produits de la masse de chaque corps par sa vitesse et l'élément de sa trajectoire, depuis une position donnée du système jusqu'à une autre, est un minimum. Or, comme l'élément de la trajectoire décrite par un corps, est égal à sa vitesse multipliée par l'élément du temps, il s'ensuit que le principe de la moindre action consiste en ce que la somme des forces vives, multipliées par l'élément du temps, est un minimum; de sorte que l'économie de la nature est réellement celle de la force vive. Si les corps ne sont sollicités par aucune force accélératrice, la somme des forces vives est constante à chaque instant : le système parvient alors d'une position à une autre dans le temps le plus court.

177. *Principe de la coexistence des petites oscillations.* Lorsqu'un système quel-

conque oscille autour d'une position d'équilibre, par plusieurs causes qui agissent simultanément, les oscillations simples qui auraient lieu, si chacune de ces causes agissait séparément, existent à la fois sans se nuire.

C'est en vertu de ce principe que les ondes circulaires qui naissent à la surface d'une eau stagnante autour de plusieurs points ébranlés, se propagent et se croisent sans se troubler, ni se confondre. Nous verrons dans la théorie du son de nombreuses applications de ce principe.

D. *Emploi des Corps solides pour transmettre ou modifier les forces.*

178. *Machines.* Rarement les forces de la nature et celles que produisent les hommes et les animaux peuvent être employées immédiatement à produire l'effet qu'on désire ; il faut presque toujours leur faire subir quelques modifications ; tantôt c'est la direction, tantôt c'est la nature de la force qui doit être changée, et presque dans tous les cas il faut augmenter la vitesse ou la masse mise en mouvement. Ces différentes modifications des forces initiales qui sont à notre disposition se font avec des appareils qu'on désigne sous le nom de Machines.

179. Toutes les machines sont composées en totalité ou en partie de corps solides ; les corps liquides et les corps gazeux sont quelquefois employés, ou comme force motrice, ou pour communiquer le mouvement ; mais nous ne pourrons nous occuper de ces derniers, sous ce rapport, qu'après avoir étudié leurs différentes propriétés.

180. Les machines employées dans les arts sont extrêmement nombreuses ; mais toutes ne sont que des combinaisons d'un très-petit nombre de machines élémentaires, qui sont : 1° le levier, dans lequel le point d'appui peut être placé entre la puissance et la résistance ou au delà de toutes les deux (*fig.* 87, 88, 89) ; 2° la poulie, qui peut être fixe ou mobile (*fig.* 90, 91) ; 3° le treuil (*fig.* 93) ; 4° le plan incliné (*fig.* 94) ; 5° la vis (*fig.* 95) ; et encore toutes ces machines simples peuvent facilement, comme nous le verrons bientôt, se ramener au levier et au plan incliné ; de sorte que ces deux dernières sont réellement les seules machines simples élémentaires.

181. Les différens objets que peuvent remplir les machines ne sont pas tous également importans ; dans un grand nombre, le but principal est la transformation de la force motrice, et peu importe qu'elle éprouve dans cette transformation une perte plus ou moins considérable : dans les horloges, par exemple, la force qui produit le mouvement est un poids qui descend, ou un ressort qui se débande, et le but réellement essentiel, c'est que le mouvement se transmette à l'appareil de manière à ce que les aiguilles se meuvent uniformément; tels sont aussi un grand nombre d'appareils qu'on désigne sous le nom d'Outils, que nous mettons au bout de nos doigts pour augmenter notre adresse ; la perfection réside uniquement dans la précision des mouvemens et dans le mode d'application de la force. Mais il existe beaucoup de machines dans lesquelles il est très-important de diminuer le moins possible la force dans sa transformation ; telles sont, par exemple, les machines destinées à moudre le blé, à élever les eaux, etc. On conçoit facilement que quelle que soit la nature du moteur, on doit toujours chercher à produire le plus grand effet dynamique possible. Il ne sera question ici que de cette dernière espèce de machines.

Pour bien concevoir et pour pouvoir calculer les effets des machines, il faut les considérer successivement dans l'état d'équilibre et dans celui de mouvement.

a. Équilibre des Machines.

182. Dans toutes les machines on parvient facilement à déterminer les conditions d'équilibre, c'est-à-dire, le rapport entre la puissance et la résistance, au moyen d'un principe très-général, qu'on désigne sous le nom de Principe des *vitesses virtuelles*, et qui peut s'énoncer ainsi : si à une machine en équilibre on imprime un mouvement infiniment petit, le produit de la puissance par l'espace décrit par son point d'application, projeté sur la direction de cette force, est égal à celui de la résistance par l'espace que parcourt le point auquel elle est appliquée, également projeté sur la direction de cette force.

183. *Équilibre du Levier.* Un levier est une barre inflexible, mobile autour d'un point et sollicité par deux forces qu'on désigne sous les noms de Puissance et Résistance. Le point d'appui peut être placé entre la puissance et la résistance (*fig.* 87), au delà de la



résistance (*fig.* 88), ou au delà de la puissance (*fig.* 89) : dans ces trois circonstances l'appareil porte le nom de Levier du premier, du deuxième et du troisième genre. Prenons pour point d'application des forces P et Q (*fig.* 87), les pieds des perpendiculaires abaissées du point *o* sur les directions de ces forces, rien ne sera changé, pourvu que nous supposions les points *a* et *b* invariablement fixés au levier A B ; en imprimant au levier un mouvement très-petit, les points d'application de la puissance et de la résistance décriront les arcs de cercle *a a'* et *b b'* qui étant infiniment petits, pourront être pris pour leurs projections. Nous aurons donc $P \times a\,a' = Q \times b\,b'$, ou $\frac{P}{Q} = \frac{b\,b'}{a\,a'}$. Or, les arcs *b b'* et *a a'* étant d'un même nombre de degrés, sont entr'eux comme les rayons des cercles auxquels ils appartiennent. Nous aurons donc $\frac{b\,b'}{a\,a'} = \frac{o\,b}{o\,a}$, et par conséquent $\frac{P}{Q} = \frac{o\,b}{a\,a}$, c'est-à-dire, que la puissance et la résistance sont dans le rapport inverse des longueurs des perpendiculaires abaissées du point de rotation sur les directions de ces forces. Il est évident que le même rapport subsisterait encore si le point d'appui, au lieu d'être placé entre la puissance et la résistance, était placé au delà de la puissance ou de la résistance (*fig.* 88 et 89).

184. *Équilibre de la poulie.* La poulie est un cercle en bois ou en métal (*fig.* 90 *et* 91) dont l'épaisseur est creusée en gorge, et qui est traversé par un axe autour duquel elle peut tourner dans une chape O M. Lorsque la chape est fixe (*fig.* 90), la puissance P et la résistance Q sont appliquées aux deux extrémités de la corde parfaitement flexible P A B Q, qui passe dans la gorge de la poulie. Si on imprime à la machine un mouvement très-petit, les points d'application décriront des arcs de cercles A A' et B B' égaux entre eux, et comme les directions des cordons restent toujours tangentes à la circonférence de la poulie, les projections de ces arcs sur les directions des forces seront les sinus des arcs décrits, et, par conséquent, pour que l'équilibre existe, il faut nécessairement que la puissance soit égale à la résistance, quelle que soit d'ailleurs l'inclinaison des forces P et Q. D'ailleurs, si l'on joint les points A et B avec le point O, on pourra considérer les forces comme étant appliquées perpendiculairement aux extrémités du levier A O B, et comme A O est égal à B O, il en résulte encore, comme précédemment, que les forces P et Q doivent être égales. Lorsque le chape est mobile (*fig.* 91), la puissance est appliquée à l'extrémité d'un cordon P A B *m* qui s'enroule autour de la poulie et dont l'autre extrémité est fixée au point *m* : la résistance Q est appliquée à l'extrémité de la chape. Il est évident que le cordon P A B *m* doit être également tendu, et, par conséquent, que la tension du cordon B *m* doit être égale à la force P ; que les directions de ces deux forces doivent être également inclinées sur le prolongement de la direction de la force Q ; et qu'enfin, leur résultante doit faire équilibre à cette même force Q. Or, si nous prenons sur la direction des forces P et *m* des lignes *a b* et *a c* pour les représenter, et

si nous construisons le parallélogramme $a\,b\,d\,c$, $a\,d$ représentera la résultante, et, par conséquent, la force Q. Or, le triangle $a\,b\,d$ est semblable au triangle B O A, car tous deux sont isocèles, et l'angle b est égal à l'angle O comme étant tous deux supplémens d'un même angle a; en effet, dans le quadrilatère a B O A, les angles en B et en A sont droits; par conséquent, l'angle O est supplément de l'angle a; dans le triangle $a\,b\,d$, l'angle b est supplément de la somme des deux autres; et comme ces derniers sont égaux à ceux formés en a par la ligne $a\,d$, il en résulte que l'angle b est aussi supplément de l'angle a. Cela posé, en comparant les triangles $a\,b\,d$ et A O B, on aura $ab : a\,d$ :: O B : A B, ou P : Q :: O B : A B, c'est-à-dire, que la puissance est à la résistance comme le rayon de la poulie est à la corde de l'arc embrassé par le cordon. Il résulte de là que cette machine sera d'autant plus avantageuse, que cette corde sera plus grande, et que le cas le plus favorable aura lieu lorsque la corde A B sera égale au diamètre (*fig.* 92); alors les deux cordons seront parallèles, et la puissance sera la moitié de la résistance.

185. *Équilibre du Treuil.* On désigne sous le nom de *Treuil*, *Tour* ou *Cabestan*, une machine (*fig.* 93) composée d'un cylindre C D, auquel est fixée une roue M N d'un plus grand diamètre, dont le centre est dans l'axe et le plan perpendiculaire à cet axe: le cylindre C D est terminé par deux cylindres plus petits m et m', nommés Tourillons, qui sont enchassés dans des appuis fixes, de manière à permettre au treuil de tourner librement autour de son axe: la puissance P agit à l'extrémité d'un cordon tangent à la roue, la résistance Q, à l'extrémité d'un cordon enroulé sur le cylindre. Il est évident que si l'on imprime à la machine un mouvement infiniment petit, les points d'application des forces décriront des arcs A A' et B B' d'un même nombre de degrés, qui seront entre eux comme les rayons A O et B O'; par conséquent, par la même raison que dans l'article (179), ces arcs pourront être pris pour leurs projections sur les directions des forces, et nous aurons P : Q :: B O' : A O, c'est-à-dire, que la puissance est à la résistance comme le rayon du cylindre est au rayon de la roue.

186. *Équilibre du Plan incliné.* Lorsqu'un corps M (*fig.* 94) est posé sur un plan incliné et qu'il est soutenu par une force quelconque P, le poids du corps et la force P doivent avoir une résultante unique perpendiculaire à la surface A B; or, pour que cette condition soit remplie, il faut que la force P soit dans un plan vertical passant par le centre de gravité du corps et dirigée suivant la plus grande pente du plan, et que la perpendiculaire K m abaissée du point de rencontre de la direction de la force P et de la verticale du centre de gravité, sur le plan incliné, tombe en dedans de la base du corps. Ces conditions étant remplies, si nous imprimons au corps un mouvement très-petit, le point K, que l'on peut regarder

comme le point d'application commun de la poissance et de la résistance, décrira une droite K K' parallèle au plan A B; la projection de cet espace sur la direction de la force P, est égale à K a, et sa projection sur celle de la force Q, est égale à b K; or, a K = K K'. sin K K' = a et b K = K K'. sin K K' b; mais les angles P K m et K K' a ayant leurs côtés perpendiculaires, ont le même sinus, et comme l'angle K K' b est aussi égal à l'angle A B C, il en résulte que K a = K K'. sin P K m et K b = K K'. sin A B C, et puisque P : Q :: K b : K a, nous aurons P : Q :: K K'. sin A B C : K K'. sin P K m, et, en supprimant le facteur commun, P : Q :: sin A B C : sin P K m, proportion qu'on peut encore mettre sous la forme

$$\text{(A). } P : Q :: AC : AB . \sin PKm. \text{ Car } \sin ABC = \frac{AC}{AB}.$$

Si la puissance P est parallèle à la longueur du plan incliné, l'angle P K m est droit, son sinus est égal à 1, et la proportion précédente devient P : Q :: A C : A B. Dans ce cas la puissance est à la résistance comme la hauteur du plan incliné est à sa longueur; par conséquent, la puissance est toujours plus petite que la résistance.

Si la puissance P est parallèle à la base du plan incliné, l'angle P K m a ses côtés perpendiculaires à ceux de l'angle B A C; par conséquent, sin P K m = sin B A C, et comme sin B A C = $\frac{BC}{AB}$, la proportion (A) deviendra P : Q :: A C : B C; dans ce cas la puissance est à la résistance comme la hauteur du plan incliné est à sa base; et la puissance n'est plus petite que la résistance qu'autant que l'angle A B C est moindre que la moitié d'un angle droit.

187. *Équilibre de la Vis*. La vis est une machine composée (*fig* 95) d'un cylindre droit, à base circulaire, enveloppé d'un filet saillant qui rampe uniformément autour de sa surface. On peut le considérer comme engendré par une section plane qui s'élèverait graduellement en tournant autour d'un cylindre à base circulaire de manière que son plan passât toujours par l'axe, et que la hauteur à laquelle il s'élèverait uniformément après chaque révolution fût constamment la même; la courbe que décrirait alors chacun de ses points porte le nom d'Hélice; on appelle Pas de la Vis l'intervalle C D qui sépare deux spires consécutives. Une pièce M N creusée de manière à recevoir la vis, porte le nom d'écrou; nous supposerons la vis fixe et verticale, la puissance P une force horizontale appliquée perpendiculairement à l'extrémité du levier N P, et la résistance, le poids de l'écrou. Si on imprime à la machine un mouvement infiniment petit, le point d'application de la résistance, qui est le centre de gravité de l'écrou, s'élèvera d'une quantité que nous représenterons par a, et le point d'application de la puissance aura décrit une portion d'hélice qui sera à une spire complète comme a est au pas de la vis: par conséquent, en désignant cet arc par s, par S une spire complète, et par p le pas de la vis, on aura $s = \frac{Sa}{p}$. pour projeter cet arc sur la

direction de la force, commençons par le projeter sur un plan horizontal passant par la direction de cette force : il est évident que cette projection fera un arc de cercle dont le rayon sera P o, et que cet arc de cercle sera compris dans le cercle entier autant de fois que l'arc d'hélice s est compris dans la spire entière ; de sorte que désignant cette projection par c, et par C le cercle entier, on aura $c = \frac{Ca}{p}$. Or, on peut prendre cet arc de cercle pour sa projection sur la force P ; par conséquent, nous aurons la proportion $P : Q :: a : \frac{Ca}{p}$ ou $P : Q :: p : C$; c'est-à-dire, que la puissance est à la résistance comme le pas de la vis est à la circonférence que tend à décrire le point d'application de la puissance. Il est évident qu'on peut regarder la vis comme un plan incliné, enroulé sur un cylindre ; on pourrait même facilement déduire les conditions d'équilibre de cette considération.

188. *Équilibre des Machines composées.* Les machines composées étant toutes formées par la réunion d'un certain nombre de machines simples, on pourrait facilement déterminer leurs conditions d'équilibre, par celles des machines élémentaires dont elles sont formées ; mais, par le principe des *vitesses virtuelles*, on peut toujours arriver directement à ces conditions d'équilibre, et souvent d'une manière plus simple. Nous en donnerons deux exemples.

La machine (*fig.* 96) qu'on désigne sous le nom de Moufle, est composée de 6 poulies réunies 3 à 3 dans deux chapes, dont l'une est fixe, et l'autre mobile. Un même cordon s'enroule sur toutes les poulies, et passe sur une poulie de renvoi. Une de ses extrémités est fixée au point m' ; à l'autre se trouve un poids P, que nous regarderons comme la puissance ; la résistance est un poids Q, suspendu à l'extrémité de la chape inférieure : si on imprime à la machine un mouvement très-petit, de manière que le poids Q monte de a, tous les cordons étant parallèles se raccourciront de la même quantité, et, par conséquent, le poids P devra descendre de a, multiplié par le nombre des cordons ; par conséquent, la puissance est à la résistance comme 1 est au nombre des cordons parallèles ou au nombre des poulies ; c'est d'ailleurs ce qu'on peut facilement vérifier par l'expérience, en faisant varier les poids P et Q, jusqu'à ce que l'équilibre existe.

La Machine (*fig.* 97) est composée de 3 poulies mobiles et d'une poulie de renvoi M ; 3 cordons fixés aux points m, m', m'' s'enroulent chacun sur une poulie, et sont fixés à la chape d'une autre ; la puissance est un poids P, placé à l'extrémité du dernier cordon ; la résistance est un poids Q, fixé à la chape de la poulie inférieure. Si par un mouvement très-petit, imprimé à la machine, le poids P descend d'une quantité a, le cordon E B se raccourcira de $\frac{a}{2}$ (114) le cordon E' B' de $\frac{a}{4}$, le cordon E'' B'' de $\frac{a}{8}$, et comme c'est du raccourcissement de ce dernier cordon que s'élève la résistance Q, on aura $P : Q :: 1 : 8$; en général la puissance est à la résistance comme

1 est à 2 élevé à une puissance égale au nombre des poulies mobiles : on peut encore vérifier directement ces conditions d'équilibre.

189. On voit, d'après ce qui précède, qu'une force donnée, quelque petite qu'elle soit, peut toujours être transformée, par une machine, de manière à faire équilibre à une autre quelque grande qu'on la suppose : quoique ce résultat soit une conséquence nécessaire du calcul et qu'il se trouve vérifié continuellement dans un grand nombre de machines que nous employons tous les jours, on s'en rend compte assez difficilement. Pour concevoir que la chose doit être ainsi, il faut remarquer que, dans une machine en équilibre, la puissance et la résistance ne peuvent produire que des mouvemens liés entre eux par une loi qui dépend de la nature de la machine ; or, les forces sont, comme nous l'avons vu, proportionnelles aux vitesses qu'elles impriment ; par conséquent, dans une machine la puissance et la résistance devront être dans le même rapport que les espaces que décriraient les points d'application des forces, si on imprimait à la machine un très-petit mouvement ; et c'est, en effet, ce qui a lieu, car à mesure que la résistance devient plus grande, relativement à la puissance, l'espace qu'elle tend à décrire devient plus petit ; de sorte qu'en prenant pour mesure des forces, les masses par les vitesses qu'elles tendent à imprimer dans toutes les machines en équilibre, la puissance est égale à la résistance.

190. Lorsque l'on veut vérifier par l'expérience les lois de l'équilibre d'une machine, on trouve ordinairement qu'on peut faire varier la puissance et la résistance dans de certaines limites, sans que pourtant l'équilibre soit rompu ; cela tient uniquement à l'inertie de la matière, au frottement, et au défaut de flexibilité des cordes ; car, pour qu'une certaine force, qu'on ajoute à la puissance ou à la résistance d'une machine en équilibre, puisse la mettre en mouvement, il faut que cette force fasse mouvoir toute la masse et que la vitesse très-petite qu'elle tend à lui imprimer, ne soit pas détruite par les frottemens et la roideur des cordes.

191. Lorsque dans une machine la puissance et la résistance sont des forces constantes, c'est-à-dire, qui n'agissent que par une seule impulsion, elles sont détruites instantanément par la réaction de la machine ; mais lorsque la puissance et la résistance sont des forces accélératrices, à chaque instant leurs actions se détruisent mutuellement ; mais, comme elles se renouvellent sans cesse, leur réaction est permanente.

b. Mouvement des Machines.

192. Lorsqu'une machine est en équilibre et qu'on lui imprime une vitesse quelconque par une force constante, les frottemens, qui sont de véritables forces accélératrices, diminuent continuellement la vitesse, et la machine est bientôt ramenée

à l'état de repos. Ainsi, une machine ne peut avoir un mouvement continu qu'autant que la force qui détermine le mouvement est une force accélératrice.

193. Lorsqu'une force accélératrice agit pour faire mouvoir une machine, cette force n'est jamais en totalité employée à vaincre la résistance de la machine : par exemple, lorsqu'on fait arriver de l'eau sur une roue à palette, la vitesse de la roue s'accélère dans les premiers instans ; mais comme à mesure que sa vitesse augmente, elle se soustrait, du moins en partie, à l'action du courant, ce dernier n'agit que par la différence de vitesse. Ainsi, une force accélératrice n'agit réellement sur une machine, lorsque cette dernière a atteint son mouvement uniforme, que par la différence de cette force avant et après l'action ; mais cette force ne se transmet pas encore en totalité, car les changemens brusques de vitesses en font disparaître une grande partie ; de plus, dans cette partie de la force motrice qui est transmise, une petite portion seulement est employée à produire l'effet cherché ; car la résistance de la machine se compose non-seulement de l'effet qu'on cherche à produire, mais encore de l'inertie et des frottemens de l'appareil.

194. En examinant les différens effets qu'une machine peut produire et les différens moteurs qu'on peut employer, on a trouvé que l'expression naturelle des effets de la machine et du moteur, dépend d'un certain nombre de facteurs tellement combinés que cette expression peut toujours se transformer en un produit d'une masse par le carré d'une vitesse ; c'est-à-dire, que le moteur et l'effet produit sont mesurés par une force vive. Il résulte de là que le calcul de l'effet d'une machine se réduit à la détermination du rapport entre la force vive employée et la force vive communiquée. Le principe de la conservation des forces vives fournit, dans tous les cas, le moyen d'obtenir ce rapport. On peut l'énoncer ainsi dans son application aux machines : *la force vive communiquée à une machine parvenue à un mouvement uniforme, est égale à celle du moteur, diminuée des forces vives perdues par les changemens brusques de vitesse et de celle que le moteur conserve après avoir exercé son action.*

On voit, d'après cela, que la machine la plus parfaite serait celle dans laquelle le moteur communiquerait toute la force vive ; mais il n'en est jamais ainsi, toujours il y a une certaine quantité de force vive perdue : ainsi jamais un moteur ne peut produire, par l'intermédiaire d'une machine un effet égal à celui qu'il produirait immédiatement. A la vérité, par la disposition de la machine, la vitesse peut être plus considérable ; mais alors la masse mise en mouvement devient plus petite, et si c'est la masse mobile qui devient plus grande, c'est toujours au dépend de la vitesse.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE III.

Corps Solides.

Porosité.		Il y a deux espèces de porosité, la Porosité Moléculaire, et la Porosité des Groupes de molécules; la première est une propriété générale des corps, la seconde est accidentelle; les pores moléculaires sont perméables aux fluides impondérables seulement; les autres sont perméables aux corps gazeux, aux corps liquides, et quelquefois aux corps solides.
Densité.		Un corps est plus dense qu'un autre lorsque sous le même volume il renferme plus de matière. Pour comparer les densités des corps, on les rapporte à celle de l'eau. On appelle densité ou pesanteur spécifique d'un corps, le nombre de fois que le poids d'un corps contient celui d'un égal volume d'eau distillée à la température de 4°. Pour obtenir la pesanteur spécifique d'un corps, il faut diviser son poids dans l'air par la différence de son poids dans l'air et dans l'eau. *Balance de Nickolson.* Précautions nécessaires pour déterminer la densité d'un corps plus léger que l'eau, et d'un corps poreux. Manière de trouver la densité d'un corps soluble ou attaquable par l'eau. Détermination de la densité des planètes, par rapport à celle du soleil; détermination de la densité de la terre; cette dernière est 4 fois plus grande que celle du soleil, et 5 fois ½ plus grande que celle de l'eau.
Phénomènes qui résultent de la stabilité plus ou moins grande d'équilibre entre les molécules des corps solides.		*Élasticité.* Elle est produite par la stabilité d'équilibre des molécules, par rapport à leurs positions relatives, et par rapport à la distance des centres de gravité. Elle diminue avec la température. Trempe. *Ductilité.* Cette propriété de certains corps est due à ce que les positions d'équilibre stable des molécules sont très-voisines les unes des autres; la ductilité augmente, en général, avec la température. *Fragilité.* Cette propriété paraît dépendre de l'élasticité; du moins on observera, en général, que les corps très-élastiques sont très-cassans. *Résistance au choc.* Le corps vibre ou se brise s'il est élastique, et se déforme s'il est ductile; explication des phénomènes produits par le choc des projectiles. *Résistance à la pression.* Elle dépend de la nature du corps, de sa forme, des points d'appui, de l'intensité et des points d'application de la force. *Résistance à la traction.* Elle dépend de la cohésion; la force de traction d'un cylindre est indépendante de sa longueur et proportionnelle à la surface de sa base. Les corps ne résistent pas également dans tous les sens. *Résistance à être rayé ou usé.* Il y a des corps qui en rayent d'autres, et sont usés par eux; la résistance d'un corps à être entamé par un autre dépend de la nature, de la forme de la pointe et de la direction de son mouvement; la dureté paraît dépendre de l'élasticité et de la cohésion.
Structure des corps solides.		Les corps de la nature se présentent tantôt sous des formes irrégulières, tantôt en lames ou fibres parallèles ou inclinées, et quelquefois enfin sous des formes régulières qui portent le nom de Cristaux.
	Structure des cristaux.	Les cristaux se prêtent tous plus ou moins à une division mécanique dans un nombre de sens déterminé; cette division mécanique continuée fait bientôt disparaître les faces du cristal qui sont obliques aux plans de division, et ne laisse subsister que celles qui leur sont parallèles. On parvient ainsi à de petits solides dont la forme est constante pour tous les cristaux appartenant à une même espèce minéralogique.

Structure des corps solides.	*Structure des cristaux.*	Ces polyèdres, premiers résultats de la division mécanique, ont reçu le nom de Noyaux ou de Forme Primitive, et les cristaux d'où ils ont été extraits ont été désignés sous celui de Formes Secondaires. Les formes primitives observées sont au nombre de 5, 1º le parallélipipède; 2º le prisme exaèdre régulier; 3º le dodécaèdre rhomboïdal; 4º la pyramide triangulaire; 5º l'octaèdre. En continuant la division des formes primitives on obtient de petits solides qui sont semblables aux molécules; les formes de molécules observées ou admises sont au nombre de 3: 1º le parallélipipède; 2º le prisme triangulaire; 3º la pyramide triangulaire. Dans les formes primitives les molécules sont réunies tantôt par leurs faces, tantôt seulement par leurs arêtes: dans ce dernier cas, elles laissent entre elles des espaces vides octaèdres. Autour de la forme primitive les molécules sont disposées de manière à former des parallélipipèdes, et ces derniers sont réunis en lames appliquées sur les faces des noyaux; mais ces lames manquent d'une ou de plusieurs rangées, tantôt parallèlement aux bords, tantôt parallèlement aux diagonales, enfin parallèlement à des lignes inclinées et aux bords et aux diagonales; c'est ce qu'on désigne sous les noms de Décroissemens sur les bords, sur les angles ou intermédiaires; ce sont ces décroissemens qui produisent les faces secondaires qui peuvent être multipliées à l'infini. Il est probable qu'il n'y a réellement qu'une seule forme primitive, qui est le parallélipipède, et que toutes les autres, admises par Haüy, sont des formes secondaires.
	Cristallisation.	Les molécules d'un corps ne peuvent se réunir régulièrement qu'autant qu'elles sont libres; aussi un corps ne peut cristalliser que lorsqu'il est en dissolution, en fusion ou à l'état de vapeurs: ces deux derniers modes de cristallisation ne sont applicables qu'à un petit nombre de corps, et ne produisent que très-rarement des cristaux bien prononcés. Lorsqu'un corps est en dissolution, les molécules sont sollicitées par deux forces: 1º l'affinité du liquide; 2º l'attraction réciproque de ces molécules. La première force va en croissant continuellement pendant toute la durée de la cristallisation; la seconde croît jusqu'à une certaine limite, au delà de laquelle elle reste constante; elle est variable sur la surface du cristal; le maximum d'attraction a lieu vers le centre des faces, et le minimum à l'angle le plus aigu: c'est à ces inégalités de l'attraction des différentes parties du cristal que sont dus les décroissemens.
Mouvement des corps solides.	*Mouvement d'un corps solide libre.*	Lorsqu'un corps est soumis à l'action d'un système quelconque de forces constantes, il aura seulement un mouvement de translation si la résultante est unique et passe par son centre de gravité; dans le cas contraire, il aura à la fois un mouvement de translation et un mouvement de rotation. Dans tous les corps il y a toujours au moins trois axes autour desquels la rotation peut se faire d'une manière permanente; mais il n'y en a que deux qui soient stables. C'est parce que l'impulsion initiale des planètes n'a point passé par leur centre de gravité, qu'elles ont acquis un mouvement de rotation sur elles-mêmes, et un mouvement de rotation autour du soleil.

Mouvement des corps solides.

- *Mouvement d'un corps solide autour d'un point, d'une ligne ou sur une surface.*
  - Lorsqu'un corps est assujetti à se mouvoir autour d'un point ou d'une ligne, si ce point ou cette ligne sont immobiles en supposant le corps libre, ils n'éprouveront point de pression lorsqu'on les supposera fixes; dans le cas contraire, il y aura une pression plus ou moins considérable.
  - Lorsqu'un corps se meut sur la surface d'un autre, le corps mobile éprouve une résistance qu'on appelle frottement, et le corps fixe une certaine pression. On appelle frottement de première espèce celui d'un corps qui glisse sur un autre, et frottement de seconde espèce celui d'un corps qui roule. On a reconnu par expérience, 1° que le frottement n'acquiert pas d'abord son maximum d'énergie; 2° que le frottement est d'autant plus petit que les surfaces sont mieux polies; 3° que le frottement est proportionnel à la pression, et ne dépend pas de l'étendue des surfaces en contact; 4° que le frottement est plus grand entre des corps de même nature qu'entre des corps de nature différente; 5° que le frottement de première espece est plus grand que celui de deuxième espèce; 6° qu'on diminue le frottement par des substances grasses, la plombagine, etc.
- *Choc des corps solides.*
  - *Ductiles.*
    - *Choc central.* Les corps se meuvent ensemble avec une vitesse égale à la somme des quantités de mouvement divisée par la masse totale.
    - *Choc excentrique.* Les corps se séparent après le choc.
  - *Élastiques.*
    - *Choc central.* La vitesse de chacun d'eux, après le choc, est égale à la vitesse qu'il aurait acquise si tous deux avaient été ductiles, diminuée de la vitesse perdue ou augmentée de la vitesse gagnée.
    - *Choc excentrique.* Indépendamment du mouvement de translation, les corps peuvent acquérir un mouvement de rotation.
- *Lois générales du mouvement d'un système de corps solides.*
  - Conservation du mouvement du centre de gravité.
  - Conservation des aires.
  - Conservation des forces vives.
  - Principe de la moindre action.
  - Coexistence des petites oscillations simples.
- *Usage des corps solides pour modifier les forces.*
  - *Équilibre des machines.*
    - Toutes les machines sont formées de la combinaison d'un très-petit nombre de machines élémentaires qui peuvent être réduites au levier et au plan incliné.
    - Dans toutes les machines la puissance est à la résistance comme l'espace décrit par le point d'application de cette dernière dans un mouvement très-petit, projeté sur la direction de cette force, est à l'espace décrit par le point d'application de la puissance projeté sur la direction de cette force.
  - *Mouvemens des machines.*
    - Les mouvemens continus des machines ne peuvent être produits que par des forces accélératrices; on estime l'effet des machines en comparant la force vive du moteur et celle de la machine.
    - La force vive communiquée est égale à celle du moteur, diminuée de celle qu'il conserve après son action et de celles qui sont perdues par les changemens brusques de vitesses.

CHAPITRE IV.

Corps liquides.

195. Les corps liquides sont, comme nous l'avons vu (112), des corps dans lesquels l'attraction réciproque des molécules est en équilibre avec la force élastique de la chaleur; mais les molécules sont à des distances assez considérables pour que l'influence de leur figure soit sensiblement nulle, de sorte qu'elles s'attirent comme si elles étaient sphériques.

§ Ier.

Porosité.

196. Puisque dans les corps liquides les molécules sont à distance, il en résulte qu'ils sont poreux; c'est d'ailleurs ce qui résulte de ce que les liquides diminuent de volume par un abaissement de température, et de l'expérience décrite (117); mais ces pores sont invisibles et sont uniquement perméables aux corps fluides impondérables.

§ II.

Densité.

197. Les corps liquides de même que les corps solides, sous le même volume, renferment des masses inégales, et, par conséquent, des poids inégaux; on détermine la densité des corps liquides, de même que celle des corps solides, en comparant le poids du corps à celui d'un égal volume d'eau; on peut, pour cela, employer les différens procédés que nous allons décrire.

198. On pèse successivement vide et plein d'eau distillée un flacon fermé avec un bouchon de verre usé à l'émeri; la différence de poids donne celui du volume d'eau qu'il renferme; on le pèse de nouveau plein du liquide dont on veut déterminer la pesanteur spécifique, et la différence

entre ce poids et celui du flacon vide donne celui du liquide. Or, dans chacune de ces opérations, le flacon pouvant être exactement rempli, puisque le bouchon de verre s'enfonce toujours de la même quantité, le volume d'eau est le même que celui du liquide ; par conséquent, en divisant le poids de ce dernier par celui de l'eau, on obtiendra exactement la pesanteur spécifique cherchée. Il est évident que lorsqu'on remplace l'eau par le liquide dont on cherche la densité, le flacon doit être égoutté, et qu'il doit être séché et bien essuyé lorsque, après avoir été rempli exactement, on a placé le bouchon.

199. On suspend un corps par un fil très-délié, et on le pèse d'abord dans l'air, et successivement dans l'eau distillée et dans le liquide dont on cherche la densité ; la perte de poids occasionnée par son immersion dans chacun des liquides, est précisément le poids d'un égal volume de fluide ; donc, en divisant la seconde perte par la première, on obtiendra la densité cherchée.

200. On se sert souvent dans le commerce, pour reconnaître les différences de densités des corps, de petits instrumens qu'on désigne sous le nom d'Aréomètres ou Pèse-liqueurs : les aréomètres sont ordinairement en verre ; ils sont composés d'une tige cylindrique A B (*fig.* 98), terminée par un renflement et par une boule M, contenant du plomb ou du mercure destiné à lester l'appareil lorsqu'il est plongé dans un liquide : le cylindre A B renferme une échelle divisée. Lorsque cet instrument est plongé dans un liquide, il se tient vertical, et s'enfonce d'autant plus que le liquide est plus léger ; car, il tend à descendre avec une force égale à son poids, et à monter avec une force égale à celui du volume du liquide déplacé ; par conséquent, pour que cette dernière force fasse équilibre à la première, qui est constante, le volume du fluide déplacé devra être d'autant plus grand que ce fluide sera moins dense. Tous les instrumens qu'on emploie dans le commerce indiquent seulement qu'un liquide est plus ou moins dense qu'un autre, mais ne donnent point leur pesanteur spécifique. Les nombres tracés sur l'échelle n'ont aucun rapport entre eux ; car on détermine le zéro, ou une division quelconque, en plongeant l'instrument dans l'eau distillée, et un degré convenu, en

le plongeant dans un mélange d'eau et de sel ; après quoi on divise l'intervalle en parties égales : par exemple, pour les aréomètres à alcool, le 10e degré est déterminé par l'immersion de l'instrument dans de l'eau distillée, et le zéro par une dissolution de sel marin, composée de 90 partie d'eau et de 10 de sel ; l'intervalle se divise en 10 parties égales, et la longueur d'un degré étant déterminée par cette opération, on la porte en-dessus et en-dessous pour étendre l'échelle. Dans le pèse-sel de Beaumé, le zéro est déterminé par l'eau distillée, et le 30e degré, par une dissolution formée de 70 parties d'eau et de 30 de sel marin. Nous allons exposer la méthode qu'on devrait employer dans la construction de ces instrumens pour qu'ils indiquassent exactement la densité des liquides dans lesquels ils seraient immergés.

201. Supposons d'abord qu'il s'agisse de construire un aréomètre pour les liquides plus légers que l'eau : on prendra un tube vide (*fig.* 99), et on le lestera de manière qu'étant plongé dans l'eau distillée, le point d'affleurement a soit au point le plus bas de la tige cylindrique ; ensuite on le pèsera et on introduira dans la boule un égal poids de mercure : l'instrument dont le poids est doublé, étant plongé de nouveau dans l'eau distillée, déplacera un volume double de liquide, et si on enlève le mercure qu'on a ajouté (1), le point b sera le point d'affleurement de l'aréomètre dans un liquide dont la densité serait deux fois plus petite que celle de l'eau. Or, comme la tige $a\,b$ est cylindrique, on pourra diviser l'intervalle $a\,b$ en 50 parties égales : ces divisions seront aussi des 50es du volume de l'instrument plongé dans l'eau distillée. Pour déterminer les densités correspondantes à chacune de ces divisions, on observera que les densités sont en raison inverse des volumes plongés ; par conséquent, en désignant par d la densité correspondante au volume immergé v, et par m le volume d'eau déplacé par l'instrument, on a la proportion $d : 1 :: m : v$, d'où $d = \frac{m}{v}$. Comme $m = 50$, on prendra pour v successivement 51, 52, 53, etc, 100, et on obtiendra les densités correspondantes à chacune des divisions tracées. On pourrait aussi diviser l'échelle de manière à avoir des degrés qui croîtraient régulièrement de $1/100^e$: pour cela il faudrait, de la proportion précédente, tirer la valeur de v, qui est $\frac{m}{d}$, et substituer successivement à la place de d, 0,99, 0,98, 0,97, etc., on obtiendrait alors des valeurs de v ; il faudrait ensuite diviser la tige de l'aréomètre

(1) Afin de ne pas être obligé de peser de nouveau le mercure lorsqu'il faut rétablir l'instrument dans son état primitif, il faut fermer la boule inférieure où se trouve le mercure qui sert de lest, et qui doit rester, par du coton que l'on comprime dans l'étranglement qui sépare les deux boules ; alors le mercure qu'on ajoute pour déterminer le point b reste dans la première boule, d'où on le fait sortir facilement.

de manière que les volumes de l'instrument, jusqu'aux points de division, fussent dans le même rapport. Le premier mode de division est beaucoup plus commode.

202. Pour construire un aréomètre destiné à mesurer les densités des liquides plus pesans que l'eau distillée, on commencera par lester le tube (*fig.* 100), de manière qu'étant plongé dans l'eau, il s'enfonce jusqu'au point a situé au sommet de la tige cylindrique ; ensuite on enlèvera une partie du mercure qui sert de lest, de manière que le poids de l'instrument soit diminué de la moitié : en plongeant l'instrument de nouveau dans l'eau distillée, il déplacera un volume d'eau deux fois plus petit ; par conséquent, si on remet le mercure enlevé de manière à rétablir l'instrument dans son état primitif, le point b sera le point d'affleurement correspondant à un liquide deux fois plus lourd que l'eau. Pour graduer l'instrument, on divisera l'intervalle ab en 50 parties égales : le volume compris entre chacune de ces divisions sera le $\frac{1}{100}$ du volume déplacé dans l'eau, et on calculera les densités correspondantes à chacune de ces divisions, comme précédemment, au moyen de la fraction $\frac{a}{v}$ dans laquelle on mettra 100 à la place de a, et successivement pour v, 99, 98, 97, etc.

203. On pourrait aussi employer un instrument divisé seulement en parties d'égales capacités, par exemple, un aréomètre cylindrique divisé dans toute son étendue, en degrés égaux, ou bien un aréomètre de forme ordinaire : dans ce dernier cas, on déterminerait, par le moyen que nous avons indiqué (161), la longueur du cylindre équivalant en volume à la partie de l'instrument submergé dans l'eau, et, divisant ensuite la longueur du tube en 50 parties égales, à partir du point a (*fig.* 101) on marquerait sur les divisions, 50, 51, 52, etc. On pourrait prendre le tube assez long pour pouvoir prolonger les divisions au delà des points a et b. Par cette disposition, pour obtenir la densité d'un liquide quelconque, il faudrait diviser par le volume de ce liquide, déplacé par l'instrument, celui qu'il déplace dans l'eau, et, en général, pour obtenir le rapport des densités de deux liquides, il faudrait diviser le nombre placé au point d'affleurement du second par le nombre situé au point d'affleurement du premier.

204. Dans les différentes méthodes que nous venons d'indiquer pour déterminer les densités des corps liquides, l'eau ne pouvant pas être à la température de 4°, on conçoit que tous les nombres déterminés par ces méthodes doivent être corrigés de l'influence de la température ; mais nous n'examinerons la manière de faire ces corrections que dans le Chap. Ier de la deuxième partie.

§ III.

Phénomènes qui résultent de la stabilité, plus ou moins grande, d'équilibre entre les molécules des corps liquides.

205. *Compressibilité.* De ce que les corps liquides sont poreux, il en résulte qu'ils doivent être compressibles : ils le sont en effet, mais ils résistent à la pression avec une si grande énergie, que ce n'est qu'en employant des forces très-puissantes qu'on parvient à les comprimer d'une quantité appréciable. On peut rendre sensible la compression des liquides par les expériences suivantes.

Dans un tube de verre cylindrique très-épais A B (*fig.* 102) et fermé à une de ses extrémités, on introduit une certaine quantité de liquide, à la surface duquel on pose le piston *m* : en comprimant avec force et subitement le piston, le liquide devient lumineux dans l'obscurité ; phénomène qu'on ne peut expliquer qu'en admettant que l'eau a été réellement comprimée.

Si après avoir rempli d'un liquide quelconque l'appareil (*fig.* 103), qui est composé d'un tube capillaire à l'extrémité duquel est soudée une boule d'une grande capacité, on fait chauffer le liquide de manière à ce qu'il remplisse exactement le tube, et si alors on ferme l'extrémité du tube en fondant le verre à la lampe d'émailleur, on remarque qu'à l'instant où l'on brise l'extrémité du tube pour permettre à l'air d'entrer dans le tube, le niveau du liquide s'abaisse d'une quantité très-sensible.

D'après les expériences faites en Amérique, par Jacob Perkins, il paraît que l'eau soumise à une pression de 100 atmosphères se comprime d'environ 2 centièmes. Ces expériences ont été faites au moyen de l'appareil (*fig.* 104) composé d'un tube cylindrique A B, métallique et imperméable à l'eau, fermé par sa partie inférieure : à la partie supérieure est adapté un bouchon C, également imperméable à l'eau, qu'on peut visser et dévisser à volonté ; à travers ce bouchon et la boîte à cuirs E passe une verge droite D qui sert de piston ; un anneau mobile *a*

sert à indiquer la quantité dont la tige D a pénétré dans le cylindre. Pour se servir de cet appareil, on commence par remplir d'eau ou d'un liquide quelconque le cylindre A B ; on place l'anneau *a* au-dessus de la boîte E, et on soumet le piston à une certaine pression, en l'introduisant dans un canon plein de liquide que l'on comprime à l'aide d'une pompe foulante, ou en descendant l'appareil dans la mer à une grande profondeur : dans le premier cas, on mesure l'intensité de la pression par une soupape conique qu'on charge de poids jusqu'à ce qu'elle puisse faire équilibre à la pression, et en déterminant d'avance de combien elle doit être chargée pour faire équilibre à la pression de l'atmosphère ; dans le second cas, la pression se mesure par la profondeur : 10^m représentent à peu près la pression d'une atmosphère. Par ces expériences, qui ont été répétées un grand nombre de fois, M. Perkins a trouvé que l'eau se comprimait à peu près de $1/_{100}$ de son volume pour une pression de 100 atmosphères ; mais, au moyen d'un perfectionnement apporté dans son appareil, il a reconnu que la compression était double de celle qu'il avait obtenue d'abord.

Quoique les liquides soient compressibles, comme ils ne le sont que que d'une petite quantité, même lorsqu'ils sont soumis à des forces très-puissantes, nous pourrons, dans un grand nombre de cas, négliger la compression qu'il éprouvent et les regarder comme incompressibles.

206. *Élasticité*. Les liquides étant compressibles, il en résulte qu'ils doivent être élastiques. Nous verrons plus tard, en effet, que c'est à leur élasticité que les liquides doivent la propriété de propager les sons ; mais Indépendamment de l'élasticité due à leur compression, les liquides sont quelquefois élastiques par la stabilité de la forme qu'ils affectent : par exemple, lorsqu'un liquide est répandu sur un corps qu'il ne peut pas mouiller, il se met en petites masses sensiblement sphériques et d'autant plus qu'elles sont moins volumineuses : si ces globules viennent frapper un corps, ils s'aplatissent, et le retour à leur forme primitive les fait rejaillir avec une force plus ou moins considérable. C'est ce qu'on peut facilement observer sur des globules de mercure qu'on agite dans un vase de verre, sur des bulles d'eau couvertes de poussière, etc.

207. *Viscosité.* Dans les corps liquides, les molécules ne s'attirent pas exactement comme si elles étaient sphériques; par conséquent, pour se mouvoir les unes autour des autres, elles éprouvent une certaine résistance. C'est ce défaut de mobilité parfaite qu'on désigne sous le nom de Viscosité.

208. *Cohésion.* Les molécules des corps liquides étant en équilibre stable, relativement à la distance de leurs centres de gravité, il en résulte qu'il faudra toujours employer une force plus ou moins considérable pour faire varier cette distance; nous avons déjà reconnu en effet que pour comprimer les corps liquides, et, par conséquent, pour diminuer la distance des molécules, il fallait employer des forces très-puissantes; on peut aussi démontrer qu'elles résistent avec une grande énergie aux forces qui tendent à les séparer. C'est à cette résistance, qui ne se développe qu'à mesure qu'on éloigne les molécules, qu'on doit donner le nom de Cohésion.

Si à la partie inférieure d'un plateau de balance on suspend horizontalement des disques de différente nature, et qu'après avoir établi l'équilibre, on applique ces disques sur la surface d'un liquide quelconque, on observe que pour séparer ces disques du liquide, il faut employer une certaine force qu'on peut facilement mesurer par des poids qu'on place dans le plateau opposé. Or, lorsque la matière du disque ne peut pas être mouillée par le liquide, si, par exemple, le disque est de verre et le liquide du mercure, c'est le disque qui se sépare du liquide, et la force employée pour cela mesure l'adhérence de ces deux substances; mais si le disque peut être mouillé, après sa séparation il est encore couvert d'une couche de liquide, et c'est réellement cette couche liquide qui s'est séparée de la surface du bain; aussi on remarque que la force nécessaire pour séparer le disque est la même, quelle que soit la substance dont il est formé, pourvu qu'elle puisse être mouillée et que la surface ne change pas; la force employée dans ce cas peut donc servir à mesurer la cohésion du liquide.

§ IV.

Équilibre des Corps liquides.

A. *Principes sur lesquels sont fondées les lois de l'équilibre des liquides.*

209. Dans la recherche des lois de l'équilibre des corps liquides, on admet, 1° que ces corps sont incompressibles ; 2° que leurs molécules sont douées d'une mobilité parfaite ; 3° qu'ils communiquent également dans tous les sens la pression qu'on exerce en un point quelconque de leur surface.

210. D'après ce que nous avons vu (205) les liquides sont réellement compressibles ; mais comme ils ne le sont que fort peu, même lorsqu'ils sont soumis à des forces considérables, on peut presque toujours les regarder comme absolument incompressibles.

La mobilité extrême qu'on admet dans les liquides, est encore une propriété dont ils ne jouissent jamais d'une manière absolue, car tous sont plus ou moins visqueux : mais comme il est impossible d'avoir égard à cette viscosité, on la regarde comme nulle. Quant à la propriété de communiquer également la pression dans tous les sens, c'est un résultat de l'observation qu'il paraît difficile de déduire directement des autres propriétés des liquides ; on peut la rendre sensible par l'expérience suivante. Un cylindre A B (*fig.* 104) dans lequel se meut le piston M, est terminé par une sphère A garnie d'un grand nombre de petits tuyaux perpendiculaires à sa surface ; en plongeant l'extrémité A dans un liquide quelconque et élevant le piston, le liquide s'introduira dans le cylindre, et en pressant le piston, le liquide jaillira suivant toutes les directions des tuyaux ; par conséquent, la pression appliquée immédiatement par le piston à la surface du liquide se transmet dans toutes les directions.

B. *Équilibre d'une masse liquide qui n'est soumise à aucune action étrangère.*

211. Lorsqu'une masse liquide est entièrement dépourvue de viscosité,

ses molécules s'attirent en raison inverse du carré de leur distance, et elle prend la forme sphérique. C'est ce qu'il est facile de démontrer directement, car la forme qu'elle prendra nécessairement devra être telle que les actions réciproques des molécules se fassent mutuellement équilibre ; or, si nous considérons une masse sphérique, divisée par des sphères concentriques en une infinité de couches infiniment minces, une quelconque de ces couches sera en équilibre. En effet, d'après ce que nous avons démontré (70), chacune des molécules qui la composent n'éprouve aucune action de la part des couches enveloppantes ; mais elles exercent sur les couches enveloppées des pressions égales et dirigées vers le centre ; or, ces pressions sont détruites par la résistance du liquide, et ne peuvent pas changer la forme des couches ; car, si le liquide est incompressible, chacune d'elles conservera exactement sa forme et ses dimensions, et si le liquide est réellement compressible, les couches étant également comprimées suivant tous les rayons de leurs surfaces, diminueront de volume sans changer de forme, et il en résultera seulement que la densité du liquide ira en croissant jusqu'au centre où se trouve le maximum de pression. Ainsi la forme sphérique satisfait à l'équilibre d'une masse liquide ; mais pour qu'il fût démontré que le liquide prend nécessairement cette forme, il faudrait prouver qu'il n'existe aucune autre figure sous laquelle l'équilibre puisse exister ; c'est ce qui est facile, car la forme la plus simple, après celle de la sphère, c'est l'ellipsoïde de révolution : en divisant une masse liquide qui aurait cette forme, en couches parallèles, par des ellipsoïdes semblables et concentriques, on trouve, par le calcul, que chaque couche n'éprouve aucune action des couches enveloppantes ; mais les pressions exercées sur les couches enveloppées étant inégales, l'équilibre ne pourrait pas subsister par la seule réaction des molécules, et il est évident qu'il en serait de même pour toute autre forme plus compliquée ; au surplus, les molécules liquides n'étant soumises qu'à leur action réciproque et étant supposées d'une mobilité absolue, la masse doit prendre une forme qui soit disposée de la même manière, relativement à tous les points de l'espace ; car il n'y a pas de raison pour que cette figure soit disposée d'une certaine manière, dans

où elle sera nulle (90, 91, 92). Or, la force centrifuge à l'équateur étant opposée à la pression que les molécules y éprouvent, la diminue d'autant ; par conséquent, elle ne pourra plus faire équilibre à celle des pôles qui n'est point altérée par la rotation : alors il arrivera nécessairement que la masse sphérique s'aplatira, jusqu'à ce que l'augmentation de pression à l'équateur, due à l'accumulation de la matière, compense la force centrifuge. Pour rendre cette conclusion plus évidente, imaginons dans l'intérieur de la sphère liquide un canal à paroi solide, dirigé d'abord suivant un rayon de l'équateur, et qui au centre se relève à angle droit pour aller aboutir à un des pôles ; lorsque l'équilibre existera dans la masse totale, le liquide renfermé dans le canal devra être aussi en équilibre isolément ; car, toutes les fois qu'un système de corps est en équilibre, on peut toujours, sans le troubler, supposer qu'un certain nombre de ces corps sont fixés invariablement, ou liés entre eux d'une manière quelconque. Ainsi, dans une masse liquide, on peut toujours, sans que l'équilibre soit dérangé, supposer qu'une partie quelconque soit solidifiée : la masse restée liquide sera en équilibre contre ces parois infiniment résistantes, comme elle l'était avant contre cette matière à l'état liquide ; car, la réaction de la masse solide sera exactement égale à la pression que le liquide exercera sur elle ; par conséquent, elle agira dans l'équilibre de la matière restée fluide, de la même manière qu'avant sa solidification. D'après cela, pour que l'équilibre existe dans le liquide enveloppé par notre canal, il faut que les pressions exercées au centre soient égales ; or, ces pressions étant dues à l'attraction des molécules vers le centre, croîtront avec la longueur des colonnes liquides ; donc, si on suppose la masse sphérique en mouvement, la colonne liquide qui aboutit au pôle descendra, et celle de l'équateur s'allongera jusqu'à ce que la différence de longueur compense la force centrifuge.

213. En supposant que la terre ait été originairement liquide, son aplatissement serait une conséquence nécessaire de sa rotation. En calculant l'aplatissement quelle aurait dû prendre d'après sa vitesse de rotation, Newton a trouvé, en supposant la masse homogène, que le diamètre des pôles devrait être à celui de l'équateur dans le rapport de 229 à 230 ;

aplatissement beaucoup plus considérable que celui qu'on a déduit de la mesure directe des méridiens. Cette différence provient de ce que la terre n'est point homogène, comme Newton l'a supposé ; car, sa densité moyenne étant 5 ½ (130), est beaucoup plus considérable que celle des corps qui sont à sa surface ; par conséquent, la densité des couches inférieures doit être plus grande que la densité moyenne.

214. Pour calculer exactement l'aplatissement de la terre dans l'hypothèse que nous avons admise, il faudrait connaître la loi suivant laquelle la densité de la terre varie ; mais cette loi nous est complétement inconnue.

On a trouvé par le calcul, dans l'hypothèse d'une loi quelconque dans la densité, une relation très-simple entre l'aplatissement de la terre, l'accroissement de pesanteur de l'équateur aux pôles, et le rapport de la force centrifuge à la pesanteur à l'équateur, qui dispense de connaître la loi de la densité de la terre pour calculer son aplatissement. Cette loi peut s'énoncer ainsi : dans toutes les hypothèses possibles sur la densité de la terre, la somme de l'aplatissement et de l'accroissement de la pesanteur de l'équateur au pôle, est égale à cinq fois la moitié du rapport de la force centrifuge à la pesanteur à l'équateur ; or, d'après les observations du pendule, l'accroissement de la pesanteur est de 0,005515, et le rapport de la force centrifuge à la pesanteur à l'équateur est $\frac{1}{289}$; par conséquent, l'aplatissement de la terre $= \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{289} - 0{,}005515 = \frac{1}{315{,}6}$.

Pour la planète Mercure on a trouvé pour ses deux axes, déduits de l'hypothèse de sa liquidité primitive et de sa rotation, les nombres 10 et 9,06, tandis que l'observation donne les nombres 10 et 9,43 : la différence est petite, mais on doit en conclure que cette planète n'est point homogène.

C. *Équilibres des Fluides soumis à des forces quelconques.*

215. Lorsqu'une masse liquide, homogène, sollicitée par des forces quelconques, est en équilibre, la résultante de toutes les forces qui agissent sur un point quelconque de sa surface libre, c'est-à-dire qui n'est point appuyée sur des obstacles fixes, est perpendiculaire à la surface. Lorsque la masse est composée de plusieurs liquides d'inégale densité, l'équilibre ne peut exister qu'autant que les liquides sont disposés par couches d'égales densités, terminées par des surfaces qui, en chaque point, sont perpendiculaires à la résultante des forces qui agissent sur lui.

La condition d'équilibre d'un fluide homogène résulte de ce qu'un liquide ne peut résister que perpendiculairement à sa surface ; car si une molécule de cette surface était sollicitée par une force oblique, elle pourrait se décomposer en deux autres : l'une perpendiculaire, qui serait détruite ; l'autre tangente, qui obtiendrait tout son effet.

D. *Équilibre des Liquides Pesans, renfermés dans des vases d'une grande capacité.*

216. *Équilibre d'une Masse Homogène.* D'après la loi d'équilibre que nous venons d'énoncer, un liquide pesant, en repos, doit être terminé par une surface perpendiculaire aux verticales de tous ses points, puisque chacun d'eux est sollicité par la pesanteur dans cette direction ; il résulte de là que toutes les eaux stagnantes sont terminées par des surfaces qui suivent la courbure de la terre ; mais lorsque ces surfaces n'ont pas une très-grande étendue, on peut les regarder comme sensiblement planes.

217. *Équilibre d'une Masse composée de plusieurs liquides.* Il suit encore de la loi d'équilibre des liquides hétérogènes, que si un vase renferme plusieurs fluides d'inégales densités, l'équilibre ne pourra exister qu'autant que ces différens fluides seront disposés en couches parallèles, terminées par des surfaces de niveau ; peu importe d'ailleurs dans quel ordre ils soient placés ; mais, pour que l'équilibre soit stable, il faut nécessairement que les couches les plus denses soient à la partie inférieure.

218. Lorsqu'un liquide est renfermé dans un vase, ses parois peuvent supporter deux espèces de pression : 1° celle qui provient d'une force qui serait appliquée en un point quelconque de la surface du liquide ; 2° celle qui provient de la pesanteur du liquide. La première pression est la même pour tous les points du vase, puisque les liquides communiquent également la pression dans tous les sens ; la seconde varie suivant des lois extrêmement simples, que nous allons exposer.

219. *Pression sur la paroi horizontale inférieure.* Soit A B C D (*fig.* 105)

un vase cylindrique renfermant un liquide homogène ; il est évident que la paroi C D sera pressée de haut en bas par une force égale au poids du cylindre liquide C D E F. Cette pression est entièrement indépendante de la forme du vase, et n'éprouverait aucune modification, si l'étendue de cette paroi restant la même, ainsi que la hauteur du liquide, le vase prenait une forme quelconque (*fig.* 106 et 107). En effet, nous avons démontré que, dans une masse liquide en équilibre, on pouvait toujours concevoir qu'une portion quelconque de cette masse fût solidifiée sans que rien pour cela fût changé dans l'équilibre ; nous pourrons donc imaginer qu'une portion du liquide C D E F (*fig.* 105) soit congelée, de manière à ne conserver liquide qu'une masse de forme quelconque, mais terminée inférieurement par la même surface B D, et supérieurement par une portion quelconque de la surface E F ; cette masse exercera sur le fond du vase une pression parfaitement identique au poids du cylindre liquide B D E F : ainsi, dans tous les vases ayant une paroi inférieure horizontale égale et des capacités plus petites que celle d'un cylindre droit de même base, les pressions exercées sur le fond de ces vases sont plus grandes que le poids du liquide contenu, et égales au poids d'un cylindre liquide de même base et de même hauteur. Dans un vase (*fig.* 107) dont les parois latérales iraient en divergeant, si par la base on élève un cylindre droit, on pourra, sans que rien soit changé, concevoir que le liquide compris entre le vase et ce cylindre soit solidifié ; or, la pression du liquide restant est égale au poids d'un cylindre liquide de même base et de même hauteur ; donc, puisqu'elle n'a pas changé, il en résulte que dans des vases qui vont en s'élargissant d'une manière quelconque, la pression exercée sur le fond du vase est plus petite que le poids du liquide, et égale au poids d'un cylindre liquide de même base et de même hauteur. En réunissant les deux résultats que nous venons d'obtenir, ils peuvent s'énoncer ainsi. La pression exercée sur la paroi inférieure horizontale d'un vase est indépendante de la forme du vase et égale au poids d'un cylindre de ce liquide qui aurait pour base celle du vase, et pour hauteur celle du liquide.

Ce résultat semble paradoxal, parce que l'on confond la pression

exercée sur le fond du vase, avec la pression exercée par le vase lui-même sur le corps qui le supporte ; cette dernière est toujours égale au poids total du liquide et du vase ; mais elle est tantôt plus grande, tantôt plus petite que la pression exercée sur le fond du vase : elle est plus grande, lorsque le vase a la forme (*fig.* 107), parce que les parois latérales soutiennent une portion du poids du liquide ; elle est plus petite, lorsque le vase est conique (*fig.* 106), parce que, comme nous le verrons bientôt, les parois latérales supérieures éprouvent une pression dirigée de bas en haut, qui se transmet par réaction en sens contraire sur le fond du vase. Dans tous les cas, la somme ou la différence des pressions verticales des parois est égale au poids total du liquide.

On peut facilement vérifier par l'expérience les phénomènes dont il s'agit, au moyen de l'appareil (*fig.* 108) : A B C D est une caisse en bois, surmontée d'un petit cylindre E F G H dans lequel se meut librement un piston M N soutenu par un cordon attaché à l'extrémité du fléau d'une balance ; sur ce cylindre on monte à vis des vases de différentes formes, on les remplit d'un liquide quelconque et on mesure, par les poids qu'on est obligé de placer dans la coupe P pour soutenir le piston M N, la pression que le liquide exerce sur la paroi horizontale inférieure et commune de tous ces vases.

220. Nous n'avons considéré jusqu'ici qu'un seul liquide homogène ; mais si le vase renfermait plusieurs liquides d'inégales densités, ils seraient disposés par couches horizontales ; dans ce cas, la pression de chaque couche sur la surface supérieure de la suivante dépendant uniquement de sa hauteur et de sa base, et cette pression se transmettant sans altération à travers toutes les autres, il est évident que la pression totale exercée sur le fond du vase sera égale au poids des couches liquides renfermées dans un cylindre vertical élevé sur le fond du vase, et qui se prolongerait jusqu'à la surface extérieure.

221. *Pressions contre les parois.* Les molécules d'une masse liquide transmettant la pression dans tous les sens, il s'ensuit que les parois éprouvent dans chacun de leurs élémens une pression perpendiculaire à leur surface, et égale aux poids d'une colonne liquide, dont la base est cet élé-

ment, et dont la hauteur est la distance de ce point de la paroi au niveau du liquide. La pression sur une étendue finie de la paroi est égale au poids d'un cylindre de liquide, qui aurait pour base l'étendue de cette surface, et pour hauteur la distance de son centre de gravité au niveau du liquide ; la raison en est évidente, car si on conçoit cette portion de la paroi divisée en un grand nombre d'élémens infiniment petits, de manière à ce que l'on puisse regarder tous ses points géométriques comme également distans de la surface du liquide, la pression totale éprouvée par cette partie de la paroi sera égale à la somme des poids d'autant de cylindres liquides qu'elle renferme d'élémens, ayant chacun pour base un des élémens, et pour hauteur sa distance à la surface de la masse liquide, somme évidemment égale au poids d'un cylindre liquide ayant pour base la surface totale de la portion de la paroi, et pour hauteur la distance moyenne de tous les points de la base à la surface du liquide, ou la distance du centre de gravité de cette base à cette surface.

Il résulte de là que lorsque la paroi A B C D (*fig.* 109) est plane et verticale (*fig.* 109), la pression supportée par la totalité de cette paroi est égale au poids d'un prisme liquide A B C D E F, dans lequel le côté de la base B E est égal à la hauteur A B, ou au poids du prisme rectangulaire A B C D G H I K, dans lequel le côté A H est égal à la moitié de la hauteur A B de la paroi submergée ; de sorte que la paroi A B C D éprouve une pression horizontale parfaitement égale à la pression verticale qu'elle éprouverait si elle formait la paroi inférieure d'un vase renfermant l'un ou l'autre de ces prismes liquides (*fig.* 110). En effet, si nous considérons une portion infiniment petite m de la paroi A B C D (*fig.* 109), la pression sera équivalente au poids d'un prisme liquide dont la base serait la surface m, et dont la hauteur serait $m\,n$; or, puisque $A\,B = B\,E$, il s'ensuit que $m\,n = m\,m'$, et que la pression au point m est égale au poids du prisme $m\,m'$, et, par conséquent, que la somme totale des pressions sur tous les points de A B C D est égale au poids du prisme A B C D E F ; mais A H étant égal à la moitié de B E, il en résulte que le prisme A B C D G H I K est équivalent au prisme A B C D E F, et, par conséquent, que le poids du liquide qu'il renfermerait représente aussi la pression supportée par la paroi A B C D.

Si le vase renfermait plusieurs liquides sans actions chimiques les uns sur les autres, ils se disposeraient par couches horizontales, suivant leur degré de densité, et la pression sur un élément quelconque de la paroi serait égale à la pression verticale qui a lieu à la même hauteur, c'est-à-dire, au poids du liquide renfermé dans un cylindre vertical qui partirait du niveau de l'élément que l'on considère, aurait pour base horizontale l'étendue de cet élément, et se prolongerait jusqu'à la surface.

Si sur la surface libre du liquide on exerçait une pression quelconque, chaque point de la paroi, indépendamment de la pression due au poids du liquide, supporterait la totalité de cette pression étrangère.

Les pressions d'un liquide pesant, quelle que soit sa nature, étant égales et contraires sur les parois opposées, se détruisent mutuellement et ne peuvent imprimer aucun mouvement au vase; mais si on perçait la paroi en un point quelconque, le liquide s'échapperait perpendiculairement à la surface de cette paroi avec une vitesse qui dépendrait de la pression qu'elle éprouvait, c'est-à-dire, de la hauteur du niveau au-dessus de l'orifice, et le vase serait poussé en sens contraire par la pression sur la paroi opposée à l'orifice, qui ne serait plus contre-balancée par la résistance de la portion de paroi supprimée. C'est ce qu'il est facile de vérifier en suspendant à un fil A B (*fig.* 111) un petit ballon M plein d'eau et garni d'une tubulure *m* : à l'instant où l'on permet au liquide de s'écouler, le ballon se meut en sens contraire de l'écoulement, et le fil A B s'écarte du fil à-plomb A C d'une quantité d'autant plus considérable, que le diamètre de l'orifice et sa distance au niveau intérieur du liquide sont plus grands. On peut encore rendre beaucoup plus sensibles les mouvemens produits par l'écoulement des liquides, au moyen de l'appareil (*fig.* 112); il consiste en un tube creux vertical A B, terminé inférieurement par une boule garnie d'ajutages percés d'orifices latéraux, et supérieurement par un entonnoir. A l'entonnoir et à la boule, et dans la direction de l'axe du cylindre A B, sont fixées des tiges terminées en pointes, qui s'engagent dans des cavités pratiquées dans les supports M et N; de sorte que l'appareil peut tourner librement autour de l'axe du cylindre : dans l'entonnoir, on fait arriver un courant d'eau qui s'échappe

par les orifices m, m' m'', etc., et produit un mouvement de rotation en sens contraire de l'écoulement.

222. *Équilibre des Liquides dans des vases communiquans.* Soit A et B (*fig.* 113) deux vases de forme quelconque, en communication par le canal inférieur C, et remplis d'un liquide homogène ; si dans ce canal nous imaginons une paroi mobile verticale $m\,n$, il est évident que l'équilibre ne pourra subsister qu'autant que cette paroi mobile sera également pressée dans tous les sens ; or, le liquide renfermé dans chacun des vases étant homogène, exerce sur $m\,n$ une pression horizontale qui dépend uniquement de la hauteur du niveau du liquide au-dessus du centre de gravité de cette paroi. Donc, l'équilibre ne peut subsister entre les liquides renfermés dans les vases A et B, qu'autant que leurs niveaux sont à la même hauteur, quelles que soient d'ailleurs les formes et les dimensions relatives des vases : il est évident que cette condition d'équilibre appartiendrait également à un nombre quelconque de vases communiquans pleins d'un liquide homogène. On peut facilement vérifier cette loi au moyen de l'appareil (*fig.* 114). A est un vase de verre d'une grande capacité, garni inférieurement d'un tuyau horizontal, sur lequel sont fixés des tubes de verre B, C, D, de dimension et de forme arbitraires ; on remplit le grand vase d'un liquide quelconque, et en établissant la communication au moyen du robinet M, on voit le liquide monter dans tous les vases à des hauteurs parfaitement égales (1), et si l'un d'eux, tel que D, ne s'élève pas jusqu'au niveau que tend à prendre le liquide, ce dernier s'élance par l'ouverture de ce vase pour atteindre la hauteur à laquelle il serait parvenu, si le vase eût été suffisamment prolongé ; mais il n'y parvient jamais : nous en verrons plus tard la raison. C'est sur les lois de l'équilibre des liquides dans les vases communiquans, que sont fondés tous les principes de la conduite des eaux et les eaux jaillissantes.

(1) Pourvu cependant qu'aucun d'eux ne soit d'un très-petit diamètre ; car alors, comme nous le verrons bientôt, le niveau du liquide dans ce tube serait au-dessus ou au-dessous de celui des autres vases, suivant que la substance de ce tube serait ou ne serait pas mouillée par le liquide.

Dans ce qui précède nous avons supposé que le liquide était homogène ; s'il en était autrement, les conditions d'équilibre ne seraient plus les mêmes. En effet, si les vases A et B (*fig.* 113) renferment deux liquides d'inégale densité, séparés par la paroi *m n*, la pression qu'elle éprouve de la part de chacun d'eux étant le poids d'un cylindre de ce fluide, qui aurait pour base l'étendue de cette paroi, et pour hauteur la distance de son centre de gravité au niveau, les poids de ces cylindres sont évidemment proportionnels à leurs hauteurs et à la densité des liquides ; or, comme ils doivent être parfaitement égaux, pour que l'équilibre puisse exister, il s'ensuit que ces hauteurs doivent être en raison inverse de la densité des liquides, et, par conséquent, lorsque deux liquides de nature différente sont en équilibre dans deux vases communiquans, la hauteur de chacun des deux niveaux, au-dessus du centre de gravité de la surface de séparation, est en raison inverse de la densité des liquides. On peut facilement vérifier cette loi au moyen d'un tube deux fois recourbé A B C D (*fig.* 115) fixé contre une plaque M N portant à côté des tiges verticales A B et D C des échelles divisées en parties égales à partir d'une même ligne horizontale *p q* : on introduit dans chacune des branches verticales un liquide différent, on mesure la distance des deux niveaux au-dessus de la ligne *p q* de départ des graduations, et on retranche de chacune de ses hauteurs celle de la surface horizontale de séparation des deux liquides : les restes sont dans le rapport inverse des densités des liquides ; on peut même se servir de cet appareil pour mesurer le rapport des densités des liquides qui ne se mêlent point et qui n'exercent aucune action chimique.

D. *Équilibre des Fluides dans les Espaces Capillaires.*

223. Les lois de l'équilibre des liquides dont nous venons de parler, ne se vérifient qu'autant que les vases qui les renferment sont d'un grand diamètre ; lorsque leur diamètre est très-petit (1), les lois de l'équilibre sont entièrement différentes :

(1) Le mot Capillaire est employé pour indiquer que les diamètres des tubes ou des espaces sont d'une petitesse extrêmement voisine de celle des cheveux.



par exemple : lorsqu'on plonge dans l'eau un tube de verre ouvert par ses deux bouts, le liquide s'élance dans le tube et s'y maintient à une hauteur d'autant plus considérable, que le diamètre du tube est plus petit, et lorsqu'on plonge dans le même liquide un tube de verre gras, ou un tube sec dans le mercure, le liquide éprouve dans le tube une dépression d'autant plus forte, que le tube est plus capillaire.

Les lois de l'équilibre des liquides, dans les espaces capillaires, sont d'une très-haute importance, et pour l'explication d'un grand nombre de phénomènes naturels, et surtout par la belle théorie qu'en a donné M. Laplace, théorie qui conduit directement, et de la manière la plus rigoureuse, à toutes les lois numériques déduites de l'observation.

Nous commencerons par exposer les faits observés; puis, nous chercherons à en déduire la nature de la cause de ces phénomènes singuliers; nous développerons ensuite la théorie de M. Laplace; enfin, nous expliquerons, à l'aide de cette théorie, plusieurs phénomènes qui dépendent des lois de l'équilibre dans les espaces capillaires.

224. *Énoncé des Faits observés.* Lorsqu'un corps est en partie plongé dans un liquide, ce dernier s'élève ou s'abaisse autour de lui, et le liquide élevé ou déprimé est terminé par une surface concave ou convexe (*fig.* 116). Il n'y a qu'un très-petit nombre de corps qui ne présentent pas ce phénomène; tel est, par exemple, l'acier poli, plongé dans l'eau; ce liquide est de niveau jusqu'au contact.

Si l'on plonge dans un liquide deux corps autour desquels il s'élève ou s'abaisse, lorsqu'ils sont suffisamment rapprochés pour que les deux surfaces courbes qui terminent le liquide autour de chacun d'eux se rencontrent, le liquide s'élève ou s'abaisse, dans l'espace qui les sépare, d'autant plus que cet espace est plus étroit; lorsque les corps sont des lames parallèles (*fig.* 117 et 118), l'élévation ou l'abaissement du liquide est en raison inverse de leur distance.

225. Lorsqu'on plonge dans un liquide, un corps percé par un canal médullaire ouvert par les deux bouts, et dont le diamètre est plus petit que le double de l'étendue horizontale de la surface courbe du liquide qui baigne la surface extérieure du corps, le liquide s'élève ou descend au-dessous du niveau extérieur, d'autant plus que ce canal est plus étroit; si ce canal est prismatique, l'élévation ou la dépression d'un même liquide est en raison inverse du périmètre des sections perpendiculaires à l'axe; si le tube est cylindrique, l'élévation ou l'abaissement est en raison inverse du diamètre. Dans un tube cylindrique, un même liquide s'élève ou s'abaisse deux fois plus qu'entre deux lames parallèles de même substance que le tube, et dont la distance est égale au diamètre du tube. La surface du liquide renfermé entre deux lames parallèles, dont la distance est capillaire, est sensiblement un demi-cylindre, dont

l'axe est horizontal et le diamètre est égal à la distance des deux lames ; le liquide contenu dans un tube cylindrique, également capillaire, est terminé par une surface qui est sensiblement une demi-sphère, dont le diamètre est égal à celui du tube (1).

226. Tous ces phénomènes ont lieu dans l'air comme dans le vide. Ils sont entièrement indépendans de l'épaisseur du corps solide sur lequel ils se développent ;

---

(1) Pour mesurer avec exactitude la hauteur du liquide dans un tube capillaire, M. Gay-Lussac s'est servi de l'appareil (*fig.* 119) : il est composé d'un vase de verre A B C D rendu vertical au moyen des vis V V' ; à sa partie supérieure, on pose une plaque *a b*, à travers laquelle passe le tube capillaire M N retenu dans une position fixe par deux petites plaques verticales, dont l'une est soudée à la plaque *a b*, et dont l'autre, mobile, peut se serrer contre la première, à l'aide des 2 vis *p* et *q*. A côté du vase se trouve une tige métallique supportée par trois pieds garnis de vis, au moyen desquelles on peut la rendre verticale, ce que l'on vérifie au moyen du fil à-plomb G H ; cette tige est divisée en millimètres et porte une lunette garnie d'un fil horizontal ; cette lunette se meut parallèlement à elle-même, au moyen d'un pignon qui s'engage dans une crémaillère : on commence par introduire dans le vase A B C D le liquide sur lequel on veut opérer, on aspire par l'extrémité du tube pour faire monter le liquide et mouiller les parois intérieures ; après quoi, on fixe la lunette de manière à ce que le fil horizontal passe par la courbure inférieure de la surface du liquide suspendu dans le tube capillaire ; ensuite, pour déterminer la hauteur du niveau extérieur du liquide, on place sur le bord du vase, sans ôter le tube capillaire, la plaque *a' b'* (*fig.* 120) et on descend la vis *s t* jusqu'à ce que la pointe touche le liquide ; on enlève une petite quantité d'eau et on fait marcher la lunette jusqu'à ce que le fil soit au niveau de la pointe. Il est évident que la distance de la lunette, dans ces deux stations, est égale à la hauteur du liquide dans le tube capillaire.

La détermination du diamètre intérieur d'un tube est une opération très-délicate, à laquelle il est impossible d'arriver directement avec une précision suffisante ; car, ces diamètres étant très-petits, une légère erreur serait une portion très-grande du diamètre total. M. Gay-Lussac emploie, pour cela, un procédé fort ingénieux, que nous allons décrire. Après s'être assuré qu'un tube est parfaitement cylindrique, en promenant dans toute son étendue une bulle de mercure, dont on mesure la longueur dans un grand nombre de positions différentes, on pèse le tube successivement vide et plein de mercure ; la différence donne le poids du cylindre de mercure, dont on peut facilement mesurer la longueur avec une très-grande précision : le probleme se trouve alors réduit à celui-ci : étant donné la hauteur et le poids d'un cylindre de mercure, droit et à base circulaire, déterminer le diamètre de la base. Ce dernier problème est facile à résoudre ; car, si ce cylindre était de l'eau distillée, son poids renfermera autant de grammes que son volume contient de centimètres cubes (95) ; en général, en prenant le gramme pour unité de poids, et le centimètre cube pour unité de volume, le poids d'un corps quelconque homogène est égal à son volume multiplié par sa densité ; il suit de là, qu'en désignant par R le rayon de la base du cylindre, par *l* sa hauteur, et par P son poids, on aura $l.\pi R^2 d = P$, d'où $R = \sqrt{\frac{P}{l\pi d}}$

Pour assujettir les lames parallèles, M. Gay-Lussac les séparait par des fils de fer dont il mesurait le diamètre en en réunissant un grand nombre, placés les uns à côté des autres, mesurant l'épaisseur totale et la divisant par le nombre des fils.

Enfin, pour déterminer la forme de la surface qui termine le liquide, ce même physicien se servait d'une lunette garnie de deux fils parallèles, dont l'un était fixe et l'autre mobile, mais parallèlement à sa direction ; au moyen de cet appareil, qu'on nomme micromètre, on peut facilement mesurer la distance comprise entre les bords les plus élevés du liquide et le point le plus bas de la surface concave, ainsi que le diamètre de la colonne liquide.

ainsi, par exemple, l'eau monte à la même hauteur dans des tubes de verre de même calibre intérieur, quelle que soit d'ailleurs leur épaisseur. Tous les corps qui sont susceptibles d'être mouillés par un liquide, et qui l'ont été préalablement, agissent de la même manière lorsqu'ils sont plongés dans ce liquide, c'est-à-dire, lorsqu'ils ont dimensions égales, le liquide s'élève à la même hauteur; enfin, dans un même tube, les liquides ne s'élèvent pas à des hauteurs proportionnelles à leur légèreté spécifique; l'eau, par exemple, dans les tubes de verre, s'élève plus que l'huile et l'alcool.

227. *Nature de la Cause des Effets Capillaires.* De ce que les phénomènes capillaires ont lieu dans le vide comme dans l'air, et de ce que l'ascension des liquides n'est point en raison inverse de leur densité, il résulte que l'action de l'air n'est pour rien dans la production de ces phénomènes. La cause qui les fait naître ne peut donc résider que dans l'action du liquide sur lui-même, et dans celle qu'il exerce sur la substance du tube. Or, l'action d'un corps sur lui-même et sur un autre peut être de deux natures différentes; c'est, ou une attraction en raison inverse du carré de la distance, ou une attraction moléculaire, insensible à toute distance finie; la première ne peut évidemment avoir aucune influence, car elle est infiniment petite, relativement à la pesanteur (1), et d'ailleurs, la capillarité étant indépendante de l'épaisseur des tubes, indique que l'influence des couches extérieures de matière, situées à une distance appréciable du liquide, est nulle; c'est ce que démontre également cette propriété remarquable de tous les corps qui peuvent être mouillés, d'agir de la même manière lorsqu'ils l'ont été : la couche liquide extrêmement mince qui les recouvre, soustrait le reste du liquide à l'action de la matière du tube, et agit seule pour produire les phénomènes en question.

Nous pouvons donc regarder comme démontré, que les phénomènes qui se développent dans les espaces capillaires, sont dus à l'attraction moléculaire du liquide sur lui-même et sur la substance du corps solide, attraction qui ne se manifeste qu'à une très-petite distance, et qui, dans les liquides, constitue leur viscosité; nous allons d'abord examiner les effets de cette attraction dans une masse liquide, en repos, et d'une forme quelconque.

---

(1) L'attraction d'un corps sphérique sur une molécule extérieure, est la même que si la masse était réunie à son centre (63); par conséquent, sur une molécule de sa surface, l'attraction est égale à sa masse divisée par le carré du rayon; mais comme la masse est égale au volume multiplié par la densité, en appellant R le rayon de la sphère et d sa densité, l'attraction sera $\frac{4\pi R^3 \cdot d}{3 R^2}$ ou $\frac{4\pi R d}{3}$, la densité de la terre étant $5\frac{1}{2}$, et son rayon étant à peu près de 6,300,000 mètres, l'attraction sera représentée par $\frac{4}{3}\pi$. 34,650,000, et l'attraction à la surface d'une goutte d'eau d'un millimètre de diamètre, serait représentée par $\frac{4}{3}\pi$. 0,001, de sorte que cette dernière attraction serait à la pesanteur, comme 0,001 est à 34,650,001, ou comme 1 est à 34,650,000,000.

228. *Pression exercée par un Liquide sur la couche infiniment mince qui le termine.* Soit A B (*fig.* 121), la surface d'un liquide ; autour d'un point quelconque *m*, comme centre, décrivons une sphère dont le rayon soit égal à la distance d'attraction sensible, la molécule ne sera attirée que par la portion de liquide comprise dans la sphère, et cette attraction sera évidemment dirigée suivant la normale *m n* : si l'on fait la même construction autour d'un point *m'* placé au-dessous de la surface A B, et si on mène par le point *m'* le plan *g f* parallèle à la surface, et le plan *a b* parallèle à *c d* et à la même distance du centre, il est évident que les portions de matière renfermées entre *g f* et *c d*, et entre *g f* et *a b*, se font mutuellement équilibre, de sorte que la molécule n'est attirée que par le liquide renfermé dans le segment *a b c*; pour la molécule *m''* située à une distance de la surface égale à celle d'affinité sensible, la sphère se trouverait entièrement comprise dans la masse liquide, la molécule serait également attirée dans tous les sens, et par conséquent, en équilibre ; il est évident que la même chose aurait lieu pour toutes les molécules qui seraient à une distance plus considérable de la surface. Nous pouvons donc conclure, que toutes les molécules qui sont renfermées entre la surface d'une masse liquide et une surface intérieure parallèle à la première, et dont tous les points en sont éloignés de la distance d'affinité sensible, sont attirées dans l'intérieur suivant la normale à la surface du liquide, que cette attraction est la plus grande possible pour les molécules de la surface, et qu'elle diminue à mesure que les molécules en sont plus éloignées.

Après avoir constaté l'existence de l'attraction exercée par une masse liquide, sur la couche infiniment mince qui la termine, examinons quelle est l'influence de la courbure de la surface sur cette attraction.

Supposons d'abord que la surface soit convexe (*fig.* 122), et cherchons l'action exercée sur la colonne de molécules située dans la direction de la normale M N ; par le point M, menons le plan tangent C D ; si dans l'espace compris entre la surface et le plan tangent, espace qu'on désigne sous le nom de Ménisque, on prend un point quelconque *m*, son attraction sur une colonne M N tendra à la soulever. En effet, si par le point *m*, on mène une ligne *m n* parallèle au plan C D, toutes les molécules, comprises entre M et *n* seront attirées de haut en bas ; mais, en prenant $n p = M n$, toutes les molécules comprises entre *n* et *p* étant attirées par la molécule *m* de bas en haut, et les molécules également distantes du point *n* étant attirées en sens contraire par des forces égales, les attractions exercées sur M *p* se détruisent mutuellement ; de sorte qu'il reste l'action de la molécule *m* sur celles qui sont au-dessous du point *p*, action qui tend évidemment à soulever la colonne. Ainsi, l'action de tous les points du ménisque tend à soulever la colonne M N ; mais, dans le cas dont il s'agit, on peut regarder le corps terminé par la surface A M B, comme étant composé d'un corps terminé par un plan C D,

moins le ménisque ; par conséquent, la pression exercée sur la colonne M N, sera composée de l'action d'un corps terminé par une surface plane, moins celle du ménisque ; or, l'action du ménisque est négative ; donc, la pression exercée par un corps terminé par une surface convexe sur une file normale de molécules, est égale à celle d'un corps terminé par une surface plane, plus celle du ménisque. Si le corps était terminé par une surface concave (*fig.* 123), on pourrait le considérer comme composé d'une masse terminée par une surface plane, plus le ménisque A M B D C, et, par conséquent, l'action sur la colonne M N serait égale à celle de ces deux corps ; or, comme l'action du ménisque tend encore évidemment à soulever la colonne, elle est encore négative, et, par conséquent, la pression exercée par un liquide dont la surface est concave, sur une colonne normale, est égale à celle d'un corps terminé par une surface plane, moins celle du ménisque. Ainsi, en désignant par M la pression exercée par un liquide terminé par une surface plane, et par N l'attraction d'un ménisque, la pression, dans un liquide terminé par une surface convexe, est $M + N$, et celle d'un même liquide dont la surface serait concave, est $M - N$.

229. *Cause de l'Élévation de la Dépression des Liquides dans les Espaces Capillaires.* Soit A B (*fig.* 124) un corps percé par un canal d'une forme quelconque et d'une dimension capillaire, plongé dans un liquide qui peut le mouiller : le liquide dans l'intérieur du canal est terminé par une surface concave. Si nous imaginons un canal solide *m p n*, partant du centre de l'espace capillaire et aboutissant en un point quelconque de la surface plane du liquide, il est évident que le liquide renfermé dans ce canal devra être en équilibre ; or, le liquide étant terminé au point *n* par une surface plane, la pression verticale sera représentée par M, et au point *m*, la surface étant concave, la pression sera seulement $M - N$; donc, le liquide sera poussé dans l'intérieur du tube avec une force égale à N, et il s'élèvera jusqu'à ce que le poids de la colonne soulevée fasse équilibre à cette force.

Lorsque le tube (*fig.* 125) ne peut pas être mouillé par le liquide, le liquide intérieur est terminé par une surface convexe ; en faisant la même construction que précédemment, la pression au point *n*, sera M, et au point *m*, elle sera $M + N$; par conséquent, le liquide devra descendre dans le tube jusqu'à ce que le poids de la colonne déprimée fasse équilibre à la force N (1).

---

(1) On peut vérifier directement l'influence de la courbure de la surface qui termine le liquide contenu dans un tube capillaire, si, dans un tube capillaire recourbé (*fig.* 126), dont une des branches est plus grande que l'autre, on met un liquide susceptible de mouiller ses parois, les deux branches étant de même calibre, le liquide s'y tiendra à la même hauteur ; mais si on verse du liquide dans la branche la plus courte, lorsque le niveau sera très-près de l'extrémité, la concavité de la surface diminuera, il y aura un instant où elle sera sensiblement plane, et en ajoutant encore du liquide, il s'élèvera au-dessus des bords du tube, et sa surface deviendra convexe. On observe que pendant toutes ses variations de forme,

230. *Lois de l'Ascension et de la Dépression des Liquides dans les tubes capillaires cylindriques.* M. Laplace a démontré que l'attraction du ménisque, que nous avons désigné par N, est égale à, $A\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R'}\right)$, A étant un coefficient constant qui dépend de la nature du liquide et de celle du tube, et R et R' les deux rayons de courbure de la surface du liquide dans l'intérieur du tube, au point le plus bas (1). Dans un tube cylindrique à base circulaire, l'expérience démontre que la surface concave est sensiblement une demi-sphère, dont le rayon est égal au demi-diamètre du tube ; par conséquent, les rayons de courbure d'une sphère étant égaux entre eux et au rayon de la sphère, en appelant D le demi-diamètre du tube, on aura $N=\frac{2A}{D}$. Ainsi la force N est en raison inverse du rayon du tube ou de son diamètre, et, par conséquent, la colonne liquide, soulevée par cette force, aura une hauteur qui variera suivant la même loi. Nous devons dire, cependant, que la longueur de la colonne liquide, depuis le point le plus bas de la surface concave, devra être un peu plus petite à cause du poids du ménisque, et comme ce poids décroît bien plus rapidement que celui du cylindre, à mesure que le rayon du tube diminue, il en résulte que la loi dont nous venons de parler n'est jamais rigoureusement exacte, mais qu'elle l'est d'autant plus, que les tubes sont plus capillaires, car l'influence du ménisque décroît avec une plus grande rapidité (2).

---

le liquide dans l'autre branche s'élève toujours davantage ; que quand la surface est plane, la différence de niveau est égale à celle qui aurait lieu si le tube était plongé dans une masse du même liquide, et qu'elle est deux fois plus grande lorsque la surface du liquide, dans la petite branche, est convexe, parce que dans le premier cas les pressions étant $M-N$ et M, la différence est N, et dans le second, elles sont $M+N$ et $M-N$, dont la différence est 2 N.

(1) Si par un point quelconque d'une courbe plane A M B (*fig.* 127), on mène la normale M N, et si, par des points pris sur cette normale, on trace une infinité de cercles qui passent par le point M, à mesure que le rayon augmentera, les cercles s'approcheront davantage de la courbe ; mais au delà d'une certaine limite, les cercles couperont la courbe : entre la série des cercles renfermés dans la courbe et celle des cercles qui la coupent, il en existe un qui s'en approche plus que tous les autres, c'est le rayon de ce cercle qui est le rayon de courbure de la courbe au point M. Si par un point M d'une surface quelconque, on mène une normale, et par cette normale, une infinité de plans, chacun d'eux coupera la surface suivant une courbe, et parmi cette infinité de courbes, il en existera deux qui auront au point M l'une le maximum, l'autre le minimum de courbure ; ce sont les rayons de courbure de ces deux courbes qu'on désigne sous le nom de Rayons de Courbures de la Surface : les deux sections qui contiennent les rayons de courbures d'une surface sont toujours à angle droit. Dans une sphère, les deux rayons de courbures sont égaux entre eux et au rayon de la sphère ; dans un cylindre circulaire, les deux sections principales sont un cercle parallèle à la base et deux lignes droites parallèles ; par conséquent, un des rayons de courbures est infini, et l'autre est le rayon de la base.

(2) En désignant toujours par D le demi-diamètre du tube, par *h* la hauteur du liquide dans l'axe du tube, et par *d* la densité du liquide, le volume du cylindre sera $\pi D^2 h$, et le volume du ménisque, qui est la différence d'une demi-sphère et d'un cylindre de même base et de même hauteur, sera

231. *Lois de l'Équilibre des Liquides entre deux Lames Parallèles dont la distance est Capillaire.* Si les deux lames peuvent être mouillées, le liquide compris dans l'espace qui les sépare sera terminé par une surface cylindrique, dont le diamètre sera la distance des lames; en désignant par D la moitié de cette distance, la valeur de N, qui est en général $A\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R'}\right)$, deviendra $A\left(\frac{1}{D}+\frac{1}{\infty}\right)$ ou $\frac{A}{D}$; car un des rayons de courbure devient égal à D, et l'autre infini. Or, cette valeur de N étant en raison inverse du diamètre, la colonne liquide soulevée et qui est soutenue par cette seule force, aura une hauteur proportionnelle à cette force, c'est-à-dire, en raison inverse de la distance des lames, et comme cette valeur de N est la moitié de celle que nous avons trouvée pour un tube cylindrique à base circulaire, dunt le rayon serait D, il s'ensuit qu'entre deux lames parallèles, un même liquide s'élève à une hauteur deux fois plus petite que dans un tube dont le diamètre serait égal à la distance des lames. Il est facile de voir que, par les mêmes raisonnemens, nous trouverions les mêmes lois pour la dépression d'un liquide entre deux lames qu'il ne peut pas mouiller.

232. *Lois de l'Équilibre des Liquides entre deux Lames inclinées.* Lorsqu'on plonge deux lames inclinées (*fig.* 129) dans un liquide qui peut mouiller la substance des lames, le liquide soulevé est terminé par une surface concave cylindrique, qui s'élève à une grande hauteur contre la ligne A D de jonction des deux lames. On peut facilement, d'après les lois de l'élévation du liquide entre les lames parallèles, trouver la nature de la courbe, suivant laquelle la surface concave du liquide rencontre chacune des lames. En effet, nous pouvons considérer le système des deux lames (*fig.* 129) comme composé d'une infinité de lames infiniment étroites parallèles deux à deux, et dont la distance irait en croissant (*fig.* 130); or, la distance des deux lames d et d' est proportionnelle à $o\,d$; par conséquent, si nous désignons par x la distance du point d au point o (*fig.* 129), la distance $d\,d'$ sera proportionnelle à x; on pourra donc la représenter par $a\,x$ (1), et si nous désignons par y

---

$\pi D^3 - \frac{2}{3}\pi D^3$ ou $\frac{\pi D^3}{3}$; par conséquent, le poids du cylindre et du ménisque sera $d\left(\pi D^2 h + \frac{\pi D^3}{3}\right)$; telle est la pression totale supportée par le liquide renfermé dans le tube au-dessous du prolongement $a\,b$ (*fig.* 128) du niveau extérieur; mais comme chaque point de la surface $a\,b$ est poussé par une force égale à N, (229) cette surface soutient la colonne liquide avec une force égale à $N\pi D^2$; nous aurons donc $N\pi D^2 = d\left(\pi D^2 h + \frac{\pi D^3}{3}\right)$, et en supprimant le facteur commun πD^2, il viendra $N = d\left(h + \frac{D}{3}\right)$ d'où $h = \frac{N}{d} - \frac{D}{3}$; et comme $N = \frac{2A}{D}$, il viendra $h = \frac{2A}{d}\cdot\frac{1}{D} - \frac{D}{3}$; d'où il résulte que la hauteur h n'est jamais rigoureusement en raison inverse du diamètre; mais le dernier terme $\frac{D}{3}$ étant très-petit, par rapport à h, lorsque le tube est très-capillaire, on peut le négliger, et la loi énoncée subsiste.

(1) a étant un coefficient constant qui dépend de l'angle des lames.

la hauteur du liquide au-dessus du point d, nous aurons $y = \frac{b}{a\,x}$ (1), puisque l'élévation du liquide entre deux lames parallèles est en raison inverse de leur distance ; or, cette dernière équation indique que la courbe $D\,m\,b$ est une branche d'une hyperbole équilatère dont les asymptotes sont $o\,b$ et $O\,D$.

233. *Équilibre d'une Goutte liquide dans un Tube Capillaire.* Supposons que le tube soit vertical (*fig.* 131), et qu'il renferme une goutte d'un liquide susceptible de mouiller ses parois, la surface intérieure du liquide sera concave, et la surface inférieure sera convexe ; la goutte sera donc sollicitée au point m par une force verticale, dirigée du haut en bas, égale à $M - N$, et au point m' par une force contraire égale à $M + N'$; par conséquent, la goutte est soutenue par $N + N'$, et le liquide s'écoulera jusqu'à ce que le poids de la colonne restant fasse équilibre à cette force : si le tube a une épaisseur infiniment petite, les courbures aux points m et m' sont égales, $N = N'$, et la longueur de la colonne soutenue est deux fois plus grande que celle qui s'élève, lorsque le tube plonge dans le liquide par sa partie inférieure ; mais lorsque le tube a une épaisseur sensible, cette épaisseur est mouillée par le liquide, et la courbure inférieure est plus petite que la courbure au point m ; de sorte que N' est plus petit que N, et la hauteur de la colonne soutenue est plus petite que le double de l'élévation du liquide dans le même tube, lorsqu'il est immergé par la partie inférieure. Si le liquide ne pouvait pas mouiller le tube, il est facile de voir que les forces provenant des deux courbures se détruiraient mutuellement, ou que la différence serait dans le sens de la pesanteur, et, par conséquent, qu'aucune portion du liquide ne pourrait être soutenue dans le tube.

234. *Mouvemens produits par la Capillarité.* Lorsqu'une goutte liquide renfermée dans un tube conique ou entre deux lames inclinées, peut mouiller la substance du tube ou des lames (*fig.* 132), le liquide est terminé par deux surfaces concaves ; mais la courbure sera plus petite au point m qu'au point m', la pression au point m' sera plus grande qu'au point m, et, par conséquent, la goutte devra se mouvoir vers le sommet du cône ou vers la ligne de jonction des deux lames. Si le liquide ne pouvait pas mouiller le corps qui l'environne (*fig.* 133), la goutte serait terminée par deux surfaces convexes, et la courbure étant plus petite au point m qu'au point m', la pression au point m serait plus grande qu'au point m' ; par conséquent, la goutte s'éloignerait du sommet du cône ou de la ligne de jonction des deux lames.

Lorsqu'on approche, à une distance capillaire, des corps légers qui flottent à la surface d'un liquide, ils se précipitent l'un sur l'autre, si tous deux sont ou ne sont pas mouillés par le liquide ; et ils semblent se repousser si l'un d'eux seulement peut être mouillé. Pour expliquer ces phénomènes singuliers, considérons deux

(1) b étant aussi un coefficient constant qui dépend de la nature du liquide.

lames planes verticales parallèles, à une distance capillaire, et plongées dans un liquide qui les mouille (*fig.* 134) : le liquide s'élèvera entre les deux lames jusqu'à une certaine hauteur : si l'on prend un point *m* situé au-dessous du niveau extérieur, ce point sera également pressé par le liquide extérieur et par le liquide intérieur ; car, si on conçoit un canal *m c a* qui aboutisse à la surface intérieure du liquide, et un autre *m d e* qui vienne s'ouvrir à la surface plane extérieure, le poids du liquide contenu dans la portion *a f* du premier, est ce qu'il faut ajouter à la pression de la surface concave, pour qu'elle soit égale à celle d'une surface plane ; par conséquent, son poids, ajouté à la pression au point *a*, compensera exactement la pression au point *e*, et le poids de la colonne liquide *f c* étant égal à celui de la colonne *d e*, il en résulte, comme nous l'avons annoncé, que le point *m* est également pressé de dehors en dedans, et de dedans en dehors ; mais si nous prenons un point *m'* situé au-dessus du niveau extérieur, le point *m* sera poussé en dehors par une certaine force, et sera attiré en sens contraire par une force plus considérable. En effet, si nous menons le canal *m' b a*, au point *m'* le liquide étant terminé par une surface plane, sera attiré vers l'intérieur par une force égale à M, et au point *a* par une force égale à M — N ; or, comme il faut tout le poids de la colonne *a f* pour compenser la force N, il en résulte que tous les points des lames qui sont au-dessus du niveau extérieur sont poussés de dehors en dedans, et, par conséquent, que si les lames sont mobiles, elles se porteront l'une sur l'autre comme si elles s'attiraient. Si les deux lames n'étaient pas mouillées par le liquide (*fig.* 135), on démontrerait comme précédemment qu'un point quelconque *m* d'une des lames située au-dessous du niveau intérieur, est également pressée de dehors en dedans ; mais tous les points, tels que *m*, qui sont baignés seulement par le liquide extérieur, éprouvent de la part du liquide environnant une pression que rien ne détruit, et qui, par conséquent, doit faire précipiter les lames l'une sur l'autre. Enfin, dans le cas où l'une des lames peut être mouillée, l'autre ne l'étant pas, le liquide intérieur est élevé contre une d'elles, et déprimé contre l'autre (*fig.* 136) ; mais la dépression et l'élévation sont moindres qu'entre deux lames de même nature, et également distantes : le calcul indique alors que les deux lames tendent à s'écarter ; mais que si on les force à se rapprocher, la ligne d'inflexion de la surface finira par coïncider avec une des lames ; alors le fluide s'élèvera ou s'abaissera entre les deux lames, et elles tendront à se rapprocher.

235. Les phénomènes capillaires se manifestent souvent dans la nature ; c'est en partie par la capillarité que les racines des plantes absorbent l'humidité de la terre qui les environne, c'est la capillarité qui élève l'huile, les graisses et la cire dans les mèches de nos différens appareils d'éclairage, etc.

236. *Cause qui détermine la Concavité ou la Convexité des Liquides autour des Corps qui y sont plongés.* Nous avons fondé toute la théorie que nous venons de déve-



lopper sur la forme concave ou convexe que prend un liquide autour d'un corps qui y est plongé, suivant qu'il est ou non susceptible d'être mouillé, il reste maintenant à chercher la cause de ce dernier phénomène. Il semble, au premier abord, qu'un corps n'est susceptible d'être mouillé par un liquide, que quand son attraction sur ce liquide est plus grande que celle des molécules liquides les unes pour les autres; mais il n'en est pas ainsi : en effet, soit M N, (*fig.* 137), une lame solide quelconque plongée dans un liquide, considérons l'action exercée par un point m de la lame sur un point a de la surface du liquide ; l'attraction dirigée suivant $m\ a$ pourra se décomposer en deux forces, l'une horizontale, dirigée suivant $o\ a$, l'autre verticale, dans le sens $a\ c$; si nous prenons un autre point m' à la même distance du point o, l'attraction de cette molécule sur le point a sera la même que celle du point m, et en la décomposant suivant les lignes $a\ o$ et $a\ d$, la composante horizontale sera égale, et dans le même sens que celle du point m, et la composante verticale sera égale et en sens contraire de celle du point m, et, par conséquent, elle la détruira. Il résulte de là que la force horizontale qui sollicite le liquide contre la lame, est double de l'action horizontale qui serait produite par une lame O N ; par conséquent, l'action de la lame serait égale à celle exercée par une colonne liquide O' N', si l'attraction de la substance de la lame était seulement moitié de celle du liquide pour lui-même. Quant à la composante verticale de l'attraction de la lame, elle est nulle pour le point a, et pour toutes les autres molécules qui sont à une distance de l'extrémité inférieure de la lame plus grande que la distance d'affinité sensible ; mais pour tous les autres il est évident quelle sera dirigée de bas en haut ; par conséquent, la pression du liquide qui baigne la lame sera plus petite que celle du liquide qui s'en trouve à une distance sensible ; le liquide ne pourra pas rester en équilibre ; il s'élèvera contre la lame, s'il peut rester adhérent avec elle ; la couche infiniment mince qui sera soulevée, soulèvera à son tour celle qui lui est contiguë : de sorte que le liquide élevé contre la lame aura une certaine étendue, et se terminera par une surface concave ; mais si le liquide ne peut pas mouiller la lame, il se repliera sur lui-même, et prendra une surface convexe ; de manière que l'augmentation de pression, due à la convexité de sa surface, puisse balancer l'action verticale de la lame.

§ V.

Équilibre des Corps Flottans.

237. Lorsqu'un corps est plongé dans un liquide quelconque, il tend à s'enfoncer par son poids, et à s'élever par la pression que le liquide exerce sur la portion de sa surface submergée.



La première force est verticale, égale au poids du corps, et appliquée à son centre de gravité. Quant à la pression du liquide contre la surface du corps, en chaque point elle est perpendiculaire à la surface, et ne dépend que de sa distance du niveau ; elle est donc égale et contraire à la pression qui serait exercée par le liquide déplacé sur les parois d'un vase qui aurait la forme de la partie du corps submergé. Or, la somme totale des pressions d'un liquide contre les parois du vase qui le contient, est égale au poids du liquide et a son point d'application au centre de gravité de la masse liquide ; donc, la pression exercée par un liquide sur un corps qui y est plongé, est verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du liquide déplacé, et appliquée à son centre de gravité. Il résulte de là, que pour qu'un corps puisse flotter à la surface d'un liquide, il faut, s'il est homogène, que sa densité soit plus petite que celle du liquide (1), et s'il ne l'est pas, il faut que son poids soit plus petit que celui d'un égal volume de liquide. Ainsi, pour qu'un corps flottant reste en équilibre, il faut, 1° que le poids du liquide déplacé soit égal au poids total du corps, 2° que le centre de gravité du corps et celui du fluide déplacé soient sur la même verticale ; car deux forces parallèles, agissant en sens contraire, ne peuvent se faire équilibre qu'autant qu'elles sont sur le prolongement l'une de l'autre.

238. Lorsqu'un corps flottant est en équilibre, cet équilibre peut être stable ou instantané ; il est stable, lorsque le corps étant très-peu dérangé de cette position, tend à y revenir ; il est instantané, lorsque le corps tant soit peu dérangé, l'abandonne sans retour. Lorsque l'on fait tourner un corps flottant autour d'une ligne horizontale, les positions d'équilibre stable et instantané se succèdent alternativement.

239. *Conditions de Stabilité des Corps Flottans.* Un corps flottant est en équilibre stable toutes les fois que le centre de gravité du corps est plus bas que celui du liquide déplacé ; en effet, soit M N (*fig.* 138),

(1) Il y a cependant des corps homogènes plus denses que l'eau et qui se tiennent à sa surface, tels sont les corps qui ne peuvent pas être mouillés, qui ont un petit volume et que l'on pose doucement sur le liquide : ce phénomène est dû à ce que le liquide se déprime autour du corps, augmente le volume du liquide déplacé, qui alors peut avoir un poids plus grand que celui du corps.

un corps flottant, G son centre de gravité, *o* celui du liquide déplacé : si on incline ce corps d'une manière quelconque, il est facile de démontrer que le corps tend à revenir dans sa position initiale ; en effet, les forces qui mettront le corps en mouvement seront, 1° le poids du corps appliqué au point G, et la poussée du fluide qui se réduit à une seule force appliquée au point *o* ; ces forces étant inégales, se réduiront en une seule ; le corps aura d'abord un mouvement de translation, comme si les forces étaient appliquées au centre de gravité (161) ; par conséquent, il montera ou descendra suivant que le poids du fluide déplacé sera plus grand ou plus petit que celui du corps, et il atteindra la ligne de flottaison primitive après une suite d'oscillations plus ou moins nombreuses ; et, indépendament de ce mouvement de translation, les forces parallèles et opposées qui agissent aux points G et M, produiront un couple qui tendra à faire tourner le corps autour de son centre de gravité, de manière à le ramener à sa position initiale (1). Mais cette condition n'est pas la seule qui puisse produire la stabilité, car elle n'est jamais satisfaite dans les corps flottans homogènes ; puisque, dans ces corps, le centre de gravité du liquide déplacé coïncide avec celui de la partie du corps submergé, et ce dernier est toujours au-dessous de celui du corps total ; cependant tous ces corps ont un nombre plus ou moins considérable de positions d'équilibre stable.

La condition générale de stabilité des corps flottans peut s'énoncer de la manière suivante. Si par le centre de gravité de la section à fleur d'eau, on conçoit un axe horizontal, tel que la somme des produits de chaque élément de la section par le carré de sa distance à cet axe soit plus petite que relativement à tout autre axe horizontal mené par le même centre, l'équilibre est stable dans tous les sens, lorsque cette somme surpasse le produit du volume d'eau déplacé, par la hauteur du centre de gravité du corps au-dessus du centre de gravité de ce volume : lorsque le

(1) Prolongeons G O (*fig.* 138), d'une qualité G O' = G O, et au point O' appliquons deux forces verticales *p* et *q* opposées, égales entre elles, et à la moitié de la poussée du fluide ; la résultante de *p* et de la moitié de la force appliquée au point *o*, sera égale à la poussée du fluide, et appliquée au point G, et il restera un couple formé par *q* et la moitié de la poussée ; par conséquent, il y aura un mouvement de translation du centre de gravité qui sera le même que si les forces appliquées aux points G et O l'étaient au point G, et de plus un mouvement de rotation autour de ce dernier.



centre de gravité du corps est au-dessous de celui du liquide déplacé, ce dernier produit est négatif, et la condition d'équilibre est satisfaite; dans les navires, l'axe en question est la ligne qui va de la proue à la poupe.

240. On conçoit, d'après ce qui précède, que les corps les plus lourds peuvent flotter à la surface des liquides; il suffit de leur donner une forme telle que le poids du volume de liquide déplacé soit plus grand que leur propre poids; c'est ainsi que des sphères creuses de cuivre ou de tout autre métal, lorsqu'elles ont des épaisseurs et des dimensions convenables, peuvent flotter à la surface de l'eau.

241. Les corps flottans sont employés avec avantage pour transporter les fardeaux, parce que la force nécessaire pour les faire mouvoir à la surface d'un liquide est beaucoup plus petite que celle qui serait nécessaire pour mettre en mouvement les machines qui sont employées sur le terrain solide, et parce que l'on peut employer comme force motrice le vent et la vapeur.

On emploie souvent les corps flottans pour soulever les fardeaux du fond de la mer : pour cela on se sert de cables que l'on fait passer sous la masse; on fixe leurs extrémités à deux ou un plus grand nombre de chaloupes : si on peut alors élever le niveau de l'eau en faisant arriver une certaine quantité de ce liquide, les chaloupes s'enfoncent jusqu'à ce que le nouveau volume d'eau déplacé soit égal au poids de la masse (poids qui, dans l'eau, est égal à son poids dans l'air diminué de celui d'un égal volume d'eau), et alors cette masse est soulevée; si on ne peut pas élever le niveau de l'eau, on charge les chaloupes de manière à les faire enfoncer; on fixe alors les cables, et en déchargeant les chaloupes, elles s'élèvent et entraînent avec elles le corps que l'on voulait soulever.

§ VI.

Mouvemens des Liquides.

A. *Mouvement d'une Masse Liquide pendant son écoulement.*

242. Nous avons vu que lorsqu'une masse liquide est renfermée dans un vase, en vertu de sa pesanteur, elle exerce contre tous les points

de la paroi des pressions perpendiculaires à sa surface ; il résulte de là, que si on perce la paroi du vase, le liquide s'écoulera avec une certaine vitesse, et éprouvera, dans l'intérieur du vase, des mouvemens que nous allons d'abord examiner.

a. *Mouvemens du liquide dans le réservoir pendant l'écoulement.*

243. Lorsqu'un vase A B C D (*fig.* 139) est percé inférieurement par un petit orifice, les molécules liquides se meuvent verticalement jusqu'à quelques centimètres de l'orifice ; mais toutes celles qui sont situées au delà, y arrivent dans toutes les directions : si l'orifice est latéral, les molécules liquides situées au-dessus et au-dessous, se dirigent aussi vers lui ; de sorte que, dans tous les cas, les molécules voisines de l'ouverture s'y portent dans toutes les directions : c'est ce que l'on peut facilement observer, en mettant dans le liquide des corps d'un très-petit volume et d'une densité peu différente de la sienne : par exemple, dans l'eau, de la sciure de bois, de la cire d'Espagne pulvérisée, etc. Lorsque le liquide sort verticalement par un orifice placé au fond du vase, et que le niveau est descendu à une petite distance de l'orifice, le liquide s'écarte de l'axe de l'orifice, et forme un entonnoir dont le sommet répond à son centre (*fig.* 140) : si le liquide avait dans le vase un mouvement de rotation, l'entonnoir se développerait plus tôt, de même que si le vase avait lui-même la forme d'un entonnoir (*fig.* 141) : si l'orifice était latéral, il ne se formerait point d'entonnoir, mais la surface du liquide éprouverait une dépression au-dessus de l'orifice (*fig.* 142).

Ces mouvemens dépendent de la forme des vases et de la hauteur du liquide, de la dimension et de la forme de l'orifice ; jusqu'ici on n'a pas pu le soumettre au calcul.

b. *Mouvement du liquide hors du réservoir.*

244. *Forme de la Colonne liquide.* La colonne liquide qui s'échappe par l'orifice a la forme d'un prisme dont la base serait l'orifice ; mais elle va en se rétrécissant jusqu'à une distance de l'ouverture d'environ la

moitié de son diamètre ; son épaisseur n'est plus alors que les 0,62 de celle qu'elle avait à l'orifice : c'est cette diminution que l'on désigne sous le nom de Contraction de la Veine fluide ; cette contraction s'observe dans toutes les directions possibles du jet ; mais lorsqu'il est vertical de haut en bas, la colonne s'effile toujours davantage, parce que la vitesse va en s'accélérant ; lorsque le jet est vertical de bas en haut, la colonne va en s'élargissant, après la contraction, parce que la vitesse diminue : dans tous les cas, au delà d'une certaine limite, la résistance de l'air divise la colonne en gouttes plus ou moins volumineuses. Lorsque le jet n'est point vertical, la colonne liquide décrit, comme les projectiles solides, une courbe qui dans le vide serait une parabole.

La contraction de la veine fluide ne provient pas d'une contraction réelle du liquide, elle résulte de ce que les molécules sortent de l'orifice avec des vitesses inégales : les molécules qui passent par le centre de l'orifice ont d'abord plus de vitesse que les autres ; par conséquent, le diamètre de la colonne liquide doit diminuer ; mais bientôt la vitesse se répartit uniformément dans la colonne, et elle prend une dimension qui resterait constante, si la pesanteur et la résistance de l'air n'agissaient pas pour faire varier la vitesse ; cette inégalité de vitesse à l'orifice provient de ce que les molécules se présentent pour sortir sous des inclinaisons très-variées, et des frottemens contre les parois de l'orifice.

Lorsque l'écoulement est vertical et que le liquide a un mouvement de rotation, il se forme intérieurement un entonnoir dû à la force centrifuge, et la colonne liquide extérieure se dispose aussi en entonnoir, mais il est opposé à celui qui se manifeste dans le vase ; lorsque les bords de l'orifice ne sont pas parfaitement nets, et que le liquide intérieur est agité, le liquide, en s'échappant, présente souvent la forme d'une colonne torse.

245. *Vitesse de l'Écoulement.* Lorsqu'un liquide s'écoule par un orifice quelconque, la vitesse, nulle au premier instant, s'accroît d'une manière continue pendant un certain temps, après lequel elle reste uniforme si le niveau reste constant, ou décroît si le niveau s'abaisse : cette accélération de vitesse, à l'origine de l'écoulement, provient de ce que la force motrice est due à la pesanteur, et ne peut imprimer une vitesse finie au

liquide qui s'écoule qu'en s'accumulant, et, par conséquent, dans un temps fini. Pour déterminer, par le calcul, la vitesse d'un liquide qui s'écoule par un petit orifice, on a supposé que si on divisait le liquide en tranches horizontales infiniment minces, ces couches se mouvraient parallélement, et que les molécules comprises dans chacune d'elles auraient au même instant la même vitesse. De cette hypothèse il est résulté, que le liquide qui s'écoule d'un vase de forme quelconque par un orifice inférieur ou latéral, dont le diamètre est très-petit relativement à celui du vase, avait une vitesse égale à celle qu'un corps solide aurait acquise en tombant d'une hauteur égale à la distance du centre de cet orifice au niveau du liquide. Or, d'après ce que nous avons démontré (75), les espaces parcourus par un corps pesant abandonné à lui-même sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir, et, par conséquent, les temps sont dans le même rapport que les racines carrées des espaces parcourus ; mais, comme les vitesses sont dans le rapport des temps, il s'ensuit que les vitesses sont aussi comme les racines carrées des hauteurs. Il suit de là, que si la hauteur de l'eau devenait 4 fois plus grande, la vitesse deviendrait seulement double. Ce résultat semble en opposition avec ce que nous avons dit sur la pression, car en un point quelconque du vase, la pression est proportionnelle à la hauteur du liquide, et comme c'est à cette pression qu'est dû l'écoulement, il semble que la vitesse doit être proportionnelle à cette hauteur : mais cette pression est une force motrice dont l'effet se mesure par le produit de la masse sur laquelle elle agit, multipliée par la vitesse qu'elle lui imprime ; or, la masse qu'elle fait sortir dans un instant très-petit pris pour unité, est un cylindre qui a pour base l'orifice, et pour hauteur l'espace parcouru dans ce temps, c'est-à-dire, la vitesse. Ainsi la masse est égale à la surface de l'orifice multipliée par la vitesse ; donc, la force motrice produite par la pression est égale à la surface de l'orifice multipliée par le carré de la vitesse ; mais comme elle est aussi mesurée par la hauteur du liquide, il s'ensuit que la hauteur est proportionnelle au carré de la vitesse, et, par conséquent, que la vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur du liquide.

Nous avons dit précédemment que les résultats du calcul étaient confirmés par l'expérience, lorsque l'ouverture d'écoulement était très-petite par rapport au diamètre du vase et à la hauteur de l'eau, et qu'il était percé en minces parois. Nous devons indiquer les procédés au moyen desquels on a reconnu cette identité. On peut employer un vase d'une grande dimension, dont une partie de la paroi est fermée par une lame de cuivre mince, percée de plusieurs trous circulaires qu'on peut ouvrir et fermer à volonté; on remplit le vase jusqu'à une certaine hauteur, et on le laisse écouler quelque temps; on divise le poids du liquide écoulé par le nombre de secondes, et on a la dépense pendant une seconde: mais il faut maintenir le niveau au même point pendant toute la durée de l'écoulement; on peut y parvenir par plusieurs procédés: le plus simple consiste à mettre dans le vase un flotteur que l'on enfonce continuellement de manière à maintenir le niveau. M. Prony a imaginé une disposition très-commode pour effectuer cette opération. A B C D (*fig.* 143) est le réservoir, *o* l'orifice, M N P Q une caisse de même forme que le réservoir, mais de plus petite dimension, qui sert de flotteur; il est fixé à des tringles M *m n p*, et N *m' n' p'*, qui soutiennent au-dessous du vase le réservoir X, garni inférieurement d'un robinet, et supérieurement d'un entonnoir recourbé R, dont l'ouverture est vis-à-vis l'orifice *o*; la caisse, les tiges et le réservoir X doivent avoir un poids plus petit que celui d'un égal volume d'eau, afin que la caisse puisse flotter à la surface du liquide: lorsqu'on ouvre l'orifice, l'eau écoulée passe dans l'entonnoir et le réservoir X, et, par conséquent, fait descendre le flotteur d'une quantité telle que le nouveau liquide déplacé est égal à celui qui s'est écoulé; le niveau reste donc le même.

248. *Écoulement par des Tuyaux Additionnels.* On a trouvé, par expérience, que quand le tuyau additionnel n'avait que quelques centimètres de longueur et qu'il était parfaitement cylindrique, la dépense de l'eau était plus grande que celle qui aurait lieu si l'ouverture était percée en mince paroi, dans le rapport de 13 à 10, et lorsque le tuyau est évasé au dehors, la dépense dépasse quelquefois le double; enfin, lorsque le tuyau est conique et a sa plus grande ouverture tournée du

côté du vase, la dépense est égale à celle qui aurait lieu par une ouverture en mince paroi, si le cône avait la forme de la veine fluide, c'est-à-dire, si sa longueur étant la moitié du diamètre de l'orifice, le petit diamètre était les $^5/_8$ de l'autre : quand l'angle du cône est plus petit, la dépense est augmentée ; lorsqu'il est plus grand, la dépense est diminuée ; mais cette influence des tuyaux additionnels n'existe que quand la substance du tuyau peut être mouillée par le liquide.

249. *Écoulement par de longs Tuyaux.* Lorsque le tuyau n'est pas horizontal, et que son inclinaison est de haut en bas, la vitesse est accélérée par la pesanteur, et comme la colonne ne peut pas s'effiler à cause de l'adhérence des liquides avec les parois et de la pression de l'air, le liquide inférieur transmet une portion de sa vitesse au liquide supérieur, et il s'établit une vitesse moyenne qui croît jusqu'à un certain point avec la longueur du tuyau, au delà duquel le frottement la fait diminuer. Lorsque le tuyau est horizontal, le frottement répété sur une grande étendue diminue continuellement la vitesse ; de manière que si la longueur du tuyau est assez considérable, relativement à la vitesse initiale, le liquide ne pourra en sortir que goutte à goutte. Les tuyaux capillaires diminuent beaucoup plus la vitesse que ceux dont le diamètre est considérable, parce que le frottement n'agissant directement que sur le liquide qui touche les parois, l'action de celui-ci sur la colonne liquide est d'autant plus grande que l'axe de la colonne est plus voisin des parois. On ne connaît point, par expérience, la loi de décroissement de la vitesse occasionnée par le frottement ; le calcul indique cependant que dans chaque point du tuyau, la vitesse est en raison inverse de la racine carrée de la longueur du tuyau depuis l'orifice. Les contours occasionnent des chocs réitérés qui diminuent considérablement la vitesse, surtout s'ils sont brusques ; il arrive même souvent que ces chocs dégagent de l'eau, l'air qui y était renfermé, et que la colonne d'eau étant interrompue, l'écoulement cesse.

250. *Pression contre les parois des Tuyaux.* Lorsqu'un liquide s'écoule par un tuyau d'une grande dimension, horizontal ou incliné, il est évident que la paroi ne pourra éprouver aucune pression, si le liquide a toute la

vitesse due à la hauteur du liquide dans le réservoir ; mais si la vitesse est plus petite, elle éprouvera une certaine pression, et si elle est plus grande, la paroi, bien loin d'éprouver une pression, sera attirée vers l'axe de la colonne : c'est ce qu'il est facile de démontrer par l'expérience ; car, si l'on perce le tuyau à la partie supérieure, dans le premier cas, aucune portion de liquide ne sortira ; dans le second, il se formera un jet plus ou moins élevé, et dans le dernier, l'air s'introduira dans le tuyau ; on pourrait, dans ce dernier cas, rendre la chose plus évidente, en adaptant au tuyau un petit tube recourbé *a b c* (*fig.* 144) plongé par sa partie inférieure dans un réservoir M ; on verrait le liquide s'élever dans ce tube pour s'écouler par le tuyau A B. Si l'ouverture était pratiquée à la partie inférieure du canal, dans le premier cas, il pourrait y avoir un écoulement, car cette partie de la paroi doit nécessairement éprouver une pression due à l'épaisseur de la colonne liquide.

251. *Eaux Jaillissantes.* Puisque la vitesse du liquide qui s'écoule par un petit orifice est égale à celle qu'acquerrait un corps en tombant d'une hauteur égale à celle du niveau du liquide au-dessus de l'orifice, et que la vitesse, à la fin de la chute, est égale à la force de projection qui devrait animer ce corps pour atteindre cette hauteur (77), il en résulte que si le jet est vertical, ou dirigé en dessus de l'horizon, il doit s'élever jusqu'à la hauteur du réservoir ; mais il n'y parvient jamais. Plusieurs causes concourent à diminuer la hauteur du jet ; ces causes sont : 1° le frottement dans le tuyau de conduite et dans l'ajutage ; 2° la résistance de l'air ; 3° la chute du liquide qui retombe sur celui qui s'élève. On a trouvé, par l'expérience, qu'on peut augmenter la hauteur du jet en prenant des orifices d'un très-petit diamètre relativement à celui des tuyaux de conduite, en les perçant dans une paroi très-mince, enfin, en inclinant un peu le jet ; on peut même élever le jet au-dessus du niveau du réservoir, en faisant arriver un courant d'air au centre de l'ajutage : l'air, en se mêlant à l'eau, rend cette dernière plus légère, et elle peut alors être portée à une plus grande hauteur.

252. *Écoulement par des Canaux.* L'écoulement des liquides par des tuyaux de conduite est singulièrement modifié par leur forme, parce que

l'on peut les considérer comme faisant partie du réservoir ; mais il n'en est pas ainsi des canaux de conduite ouverts à leur partie supérieure, ils n'ont aucune influence sur la dépense du réservoir : un canal de forme quelconque fournit dans le même temps la même quantité d'eau qu'il reçoit du réservoir à son autre extrémité, et, par conséquent, dans une tranche quelconque du canal il passe la même quantité d'eau dans le même temps. Il suit de là, que la vitesse du courant doit augmenter à mesure que le canal se rétrécit, et diminuer lorsque sa largeur augmente, et que si le canal est très-incliné, comme la pesanteur augmente continuellement la vitesse du courant, ses dimensions doivent diminuer dans la même proportion. Dans une même tranche du canal, la vitesse n'est point égale pour toutes les molécules ; celles qui sont situées contre les parois sont retardées par leur frottement contre ces parois, et elles retardent à leur tour celles qui les avoisinent : le maximum de vitesse existe vers le centre du courant, à une distance de quelques centimètres au-dessous du niveau ; la vitesse moyenne est à peu près les $\frac{4}{5}$ de celle du centre de la surface. Dans les canaux qui ont peu de pente, la résistance des parois, en diminuant continuellement la vitesse moyenne, élève le niveau à une hauteur plus ou moins considérable.

B. *Mouvement Oscillatoire des Liquides.*

253. Lorsqu'un liquide est renfermé dans un siphon renversé (*fig.* 145), les deux branches ayant même calibre, le liquide se trouve à la même hauteur dans chacune d'elles ; si, par un moyen quelconque, par l'aspiration, par exemple, on élève une des colonnes liquides et qu'on l'abandonne à elle-même, elle descendra au-dessous du niveau primitif, en vertu de la vitesse qu'elle aura acquise, y reviendra en la dépassant encore, et fera autour de cette position initiale des excursions qui finiront par s'anéantir au bout d'un certain temps. On démontre par le calcul que ces oscillations sont isochrones, et si les branches du siphon sont verticales, la durée des oscillations est la même que celle d'un pendule dont la longueur serait la moitié de la longueur totale de la colonne liquide.

254. Lorsqu'on ébranle, d'une manière quelconque, un point de la surface d'une eau tranquille, il se forme autour du centre d'ébranlement de petites ondes circulaires qui se propagent avec une grande rapidité. M. Poisson est parvenu, au moyen d'une analyse très-profonde, à découvrir que dans le cas où l'ébranlement est produit par le soulèvement d'un corps plongé, il se forme deux espèces d'ondes : les premières naissent au même instant en nombre infini, et se propagent dans tous les sens avec une vitesse uniformément accélérée, comme celle de la chute des corps graves ; la distance de deux sommets consécutifs croît proportionnellement au carré du temps, et les hauteurs décroissent en raison inverse de ce même carré lorsque le liquide est renfermé dans un canal d'une largeur constante, ou suivant la 4ᵉ puissance du temps, lorsque le fluide est libre : ces ondes sont peu sensibles à cause de la rapidité de l'abaissement des sommets. Les autres ondes naissent aussi en nombre infini et en même temps ; mais elles se propagent uniformément avec une vitesse proportionnelle à la racine carrée du diamètre de l'ébranlement ; les hauteurs des sommets décroissent en raison inverse de la racine carrée ou de la première puissance du temps, suivant que le liquide est contenu dans un canal, ou parfaitement libre : ces dernières ondes sont beaucoup plus sensibles que les premières, surtout dans le voisinage de l'ébranlement.

Les ondes qui se manifestent à la surface d'une masse liquide se propagent dans l'intérieur à une très-grande profondeur. Lorsque les ondes viennent à rencontrer un corps fixe et isolé, elles sont interrompues dans une portion de leur étendue. La portion de l'onde qui va frapper le corps résistant, se réfléchit sur elle-même et se propage en sens contraire, de la même manière qu'elle se fût propagée directement si elle n'eût point rencontré d'obstacle, et les ondes qui ont été interrompues par la rencontre de l'obstacle, se reforment complétement derrière lui, et s'étendent au delà comme si elles n'eussent point été interrompues. Lorsqu'à la surface d'une eau stagnante, on établit plusieurs centres d'ébranlement, les séries d'ondes se croisent sans se troubler. Tous ces

résultats de l'observation peuvent facilement être vérifiés, en laissant tomber des corps d'un petit volume dans un bassin d'eau stagnante.

C. *Choc des Liquides contre les Corps Solides.*

255. Lorsqu'un liquide est en mouvement et qu'il rencontre un corps solide en repos, ce dernier éprouve une percussion qui dépend de sa forme, de la direction et de la vitesse du courant. Jusqu'ici on a considéré ce choc comme parfaitement égal à la résistance que le solide éprouverait s'il se mouvait dans le liquide en repos avec une force égale et contraire; cependant il paraît, d'après les expériences qui ont été faites, qu'il y a réellement une différence entre ces deux effets.

Pour déterminer, par la théorie, l'effet du choc des liquides, on les considère comme composés de molécules parfaitement mobiles, qui, après le choc, s'échappent promptement pour laisser frapper à leur tour les molécules qui les suivent, sans altérer ni leur vitesse, ni la direction de leur mouvement.

De cette hypothèse on a déduit que le choc était proportionnel à la densité du liquide, à l'étendue de la surface choquée, au carré de la vitesse du courant, et au carré du sinus de l'angle sous lequel la direction du courant rencontre la surface choquée: on trouve de plus, que la valeur absolue de la percussion sur un plan perpendiculaire au courant, est égale au poids d'un prisme liquide qui aurait pour base l'étendue de la surface choquée, et pour hauteur le double de celle qui produirait la vitesse du courant.

Tous ces résultats du calcul ne sont pas parfaitement confirmés par l'expérience, attendu que dans la théorie on néglige l'influence des molécules liquides après le choc, et cependant elle est souvent considérable; elles produisent des remous, en vertu desquels le liquide s'élève en avant du corps, s'abaisse graduellement le long des parois jusqu'à la partie inférieure, où il se forme une cavité d'autant plus profonde que la vitesse est plus considérable.

L'expérience confirme sensiblement que la résistance des liquides est

proportionnelle à leur densité : ces expériences consistent à faire osciller un même pendule dans différens liquides, et à compter le temps de la durée du mouvement ; on trouve alors que cette durée est en raison inverse de la densité du liquide. L'expérience se trouve aussi d'accord avec la théorie, pour indiquer que les résistances sont proportionnelles à l'étendue des surfaces choquées, lorsqu'elles sont semblables, et aux carrés des vitesses, lorsqu'elles ne sont pas trop considérables, et que la largeur du canal est très-grande relativement à celle du corps ; mais les résistances sur les surfaces inclinées ne suivent pas la raison des carrés des sinus des angles d'incidence ; elles s'en écartent d'autant plus, que les angles sont plus petits. Cependant cette loi peut être regardée comme suffisamment exacte lorsque les angles sont compris entre 50 et 90°. Enfin, relativement à la valeur absolue de la résistance d'un plan dirigé perpendiculairement au courant, l'expérience indique qu'elle est égale au poids d'un cylindre liquide, ayant pour base la surface choquée, et seulement pour hauteur, la hauteur due à la vitesse, pourvu que la vitesse ne soit pas assez forte pour élever le liquide en avant du corps, et produire derrière lui une grande dépression ; et en général on a observé, que quand la largeur du canal n'était pas très-considérable relativement à celle du corps, la résistance augmentait dans un très-grand rapport, à cause de la difficulté que les molécules trouvaient à s'échapper après le choc.

De tout cela il résulte, que nous ne connaissons point encore, ni par la théorie, ni par l'observation, la manière de déterminer la résistance d'un corps qui se meut dans un liquide, ou le choc d'un corps en repos par un liquide en mouvement, lorsqu'on connaît la vitesse du corps ou du courant, ainsi que la forme, les dimensions de la portion du corps submergé. Mais on peut conclure des résultats de l'observation, que la résistance ou le choc, pour un même corps et dans les mêmes circonstances, croît plus rapidement que le carré des vitesses, qu'elle diminue à mesure que le corps se présente sous des faces plus inclinées, qu'au delà d'une certaine limite, à mesure que le canal se rétrécit, la résistance augmente très-rapidement ; et enfin, que si un corps tombait à travers une masse liquide, l'influence permanente de la pesanteur accélérerait la vitesse ;

mais comme la résistance opposée par le liquide croîtrait plus rapidement que la vitesse, il arriverait nécessairement une époque à laquelle cette résistance serait égale à la pesanteur ; alors la vitesse du corps deviendrait constante. C'est par suite de ces principes que les piles des ponts sont armées d'éperons aigus, que les navires sont disposés à l'avant, de manière à couper facilement l'eau, et qu'au contraire on resserre dans un canal très-étroit les courans qui doivent mettre en mouvement des roues à palettes, etc.

§ VII.

Usage des Corps liquides pour transmettre et modifier les Forces.

256. Lorsqu'un corps liquide est contenu dans un vase fermé de toute part, nous avons vu que, si en un point quelconque de la paroi du vase on exerçait une pression quelconque, elle se transmettait sur tous les autres. C'est sur cette propriété caractéristique des liquides qu'est fondé leur emploi comme machine. De toutes les machines dont le jeu est fondé sur les propriétés des liquides, la plus importante est la presse hydraulique, dont la découverte est due à Pascal. Nous allons la décrire.

257. *Presse Hydraulique.* Imaginons un tube deux fois recourbé A B C D (*fig.* 146), dont les branches cylindriques et verticales aient des diamètres inégaux, et supposons que ce tube étant rempli d'un liquide quelconque, on applique sur les surfaces libres du liquide les deux pistons M et N. Si une force quelconque P agit sur la surface du piston N, cette force se transmettra à travers le liquide, et le piston M sera poussé en sens contraire avec une force qui sera à la force P comme la surface du piston M est à la surface du piston N ; car, chaque portion de la paroi dont l'étendue est égale à celle du piston N, supporte une pression égale à P. Ainsi, dans l'appareil dont il est question, l'effet d'une force peut être augmenté dans un rapport quelconque ; mais la vitesse communiquée est en raison inverse de cette augmentation de pression ; car, lorsque le piston N descend d'une certaine quantité, le liquide déplacé ne s'élève dans le cylindre A B que d'une quantité réciproque aux surfaces AA' et DD' ; ainsi les

effets de cette machine sont absolument semblables à ceux d'un levier dans lequel la puissance et la résistance seraient appliquées à des distances du point de rotation qui seraient dans le même rapport que les surfaces des bases des cylindres AA' et DD'.

D'après cela on concevra facilement la disposition et l'effet de la presse hydraulique : A B C D (*fig.* 147) est le cadre de la presse ; E une plaque de fonte qui communique la pression au corps F ; la tige G de la plaque E entre à frottement dans le corps de pompe I ; ce corps de pompe communique par un tuyau horizontal avec une pompe foulante L, placée dans un réservoir d'eau N ; la tige du piston est mise en mouvement par le levier O P mobile autour du point O. Cette pompe foulante renferme deux soupapes *m* et *n* : la première s'ouvre par une pression verticale de haut en bas, l'autre par une pression horizontale de dehors en dedans ; toutes deux sont maintenues fermées par des ressorts en spirale. La tige verticale Q, mobile sur sa ligne milieu comme axe, porte un mentonnet qui, en pressant la tête de la soupape *n*, la force à s'ouvrir.

Lorsqu'on élève le piston de la pompe, la pression de l'eau du réservoir N fait ouvrir la soupape *n*, le corps de pompe se remplit de liquide, et lorsqu'on abaisse le piston, l'eau renfermée dans le corps de pompe par sa pression ferme la soupape *n*, ouvre la soupape *m*, et s'introduit dans le cylindre I, fait monter le piston G, et comprime les objets placés au-dessus de la plaque F. Pour desserrer les objets F, on élève le piston, on ouvre la soupape *n* au moyen de la tige Q ; la pression de l'eau renfermée dans le cylindre I fait remonter ce liquide dans le réservoir N, et la plaque E descend. Pour calculer l'effet de cette machine, supposons qu'on applique à l'extrémité du levier uue force équivalente au poids de 25 kilogrammes, et que la longueur de O P soit d'un mètre, et O R de 5 centimètres, l'effort sur la tête du piston sera de 25 kilogrammes multipliés par $\frac{1^m}{0,05}$, c'est-à-dire, de 500 kilogrammes ; et si nous supposons que la surface de la section du corps de pompe I soit cent fois plus grande que celle de la pompe foulante, la pression exercée sur le corps F sera équivalente au poids de 50000 kilogrammes.

§ VIII.

Usages des Corps liquides comme Moteurs.

258. Lorsqu'un liquide est en mouvement, on peut toujours employer la force, ou du moins une partie de la force qui l'anime à faire mouvoir une machine. On n'emploie jamais comme moteur que les liquides mis en mouvement par leur propre pesanteur, attendu que quand on emploie une force pour mettre un liquide en mouvement, afin qu'il puisse ensuite agir sur une machine, il est toujours plus avantageux d'appliquer immédiatement la force à la machine. Aussi, dans les travaux industriels, l'eau n'est jamais employée comme force motrice que quand elle s'écoule par son poids sur une pente plus ou moins inclinée, ou qu'elle tombe brusquement d'une certaine hauteur. La force ou la quantité de mouvement renfermée dans l'eau qui se meut, se mesure comme celle de tous les autres corps par le produit de la masse par la vitesse ; mais comme la masse est elle-même proportionnelle à la vitesse, il s'ensuit que la force motrice de l'eau est proportionnelle au carré de sa vitesse. Quels que soient la nature de la machine et l'appareil destiné à recueillir la force motrice de l'eau pour la transmettre à la machine, il est impossible de la prendre en totalité ; car, 1° il faut nécessairement que l'eau, après avoir agi sur la machine, puisse s'échapper pour faire place à celle qui la suit et qui doit agir à son tour, et le liquide ne peut ainsi s'échapper après son action, qu'autant qu'il conserve une partie de sa vitesse ; 2° l'appareil qui reçoit l'action de l'eau pour transmettre du mouvement à la machine, doit se mouvoir lui-même ; il doit donc céder sous l'effort de l'eau, acquérir une certaine vitesse, et par conséquent l'eau n'agit plus que par l'excès de sa vitesse sur celle du corps qui reçoit son action. Ainsi jamais la totalité de la force motrice d'un courant ne peut passer entièrement dans une machine ; d'où il suit que si une machine était destinée à faire remonter l'eau qui, par sa chute, la met en mouvement, la quantité d'eau remontée à la hauteur du niveau du réservoir

serait, dans un temps donné, beaucoup plus petite que celle qui s'est écoulée pour produire le mouvement de la machine.

259. L'eau peut agir comme force motrice de trois manières différentes : par percussion, par la pression, et en même temps par percussion et pression. L'eau agit par percussion, lorsquelle vient frapper avec une certaine vitesse les pièces de la machine qu'on lui oppose pour recevoir son mouvement, et s'enfuit immédiatement après le choc : c'est ainsi que l'eau agit dans les roues à aubes qui sont placées dans un courant. L'eau agit par simple pression, lorsque n'ayant aucune vitesse initiale, ou n'ayant qu'une vitesse initiale égale à celle du point d'application, elle rencontre un corps solide quelle entraîne par son poids ; c'est ce qui arrive dans une roue à godet, lorsque la vitesse de l'eau est égale à celle de la circonférence de la roue. Enfin, l'eau agit par percussion et par impulsion, lorsqu'elle tombe sur une roue à godet avec une vitesse plus grande que celle de la roue.

De tous les modes d'application de la force de l'eau, le plus avantageux, c'est-à-dire, celui au moyen duquel on peut prendre à l'eau la plus grande portion de sa force motrice, c'est celui dans lequel elle agit par simple pression ; et cependant les machines mues par pression sont les plus rarement employées, comme si le fracas de l'eau qui agit par percussion était une indice de l'énergie de sa force, et le calme qui accompagne son action par pression, une preuve de faiblesse.

Ce serait ici le lieu de décrire les différens appareils qu'on a imaginés pour recevoir l'action de l'eau, et d'examiner dans chacun d'eux les dispositions les plus favorables ; mais nous serions entraîné hors des limites que nous nous sommes prescrites. Cependant nous croyons qu'il n'est pas inutile de décrire la machine hydraulique découverte par Montgoltier, et désignée sous le nom de Belier Hydraulique, parce que c'est de toutes les machines mues par l'eau, celle qui est la plus avantageuse et la plus économique, et d'ailleurs c'est la seule dont le jeu, pour être entendu, d'après ce qui précède, exige quelques développemens.

260. *Belier Hydraulique.* A B (*fig.* 148) est un tuyau communiquant avec la partie inférieure d'un réservoir M ; à l'extrémité de ce tuyau se

trouve une ouverture circulaire C par laquelle le liquide peut s'échapper ; au-dessous de cette ouverture est un boulet D retenu par des brides ; en avant il existe un ajutage *a b c d*, supportant une cloche F ; à la partie inférieure latérale se trouve un tuyau d'ascension G H, et sur sa paroi inférieure un petit cylindre *e f g h* percé inférieurement d'une ouverture circulaire *o*, fermé par le boulet *d* ; enfin *m n* est un espace rempli d'air. Tout cet appareil est en fonte ; les boulets D et *d* sont creux et ont une densité seulement deux fois plus grande que celle de l'eau.

Lorsque l'eau s'écoule par le tuyau A B avec une vitesse due à la hauteur du niveau du réservoir, le boulet D est soulevé, s'applique contre l'ouverture C et l'écoulement cesse ; alors il y a une réaction contre toutes les parois du tuyau ; la soupape *d* est soulevée, et une partie de l'eau passe dans la cloche, et de là dans le tuyau d'ascension, et les coussins d'air *m* et *n* sont comprimés ; la pression de l'eau diminue par cet écoulement, et les parois qui ont été comprimées, ainsi que les deux coussins d'air, réagissent par leur élasticité : l'eau est refoulée vers le réservoir ; il se forme une espèce de vide, les soupapes retombent, et l'eau recommence à s'écouler par l'orifice C ; bientôt sa vitesse parvient de nouveau à son maximum, le boulet D est soulevé, et les mêmes phénomènes se reproduisent périodiquement.

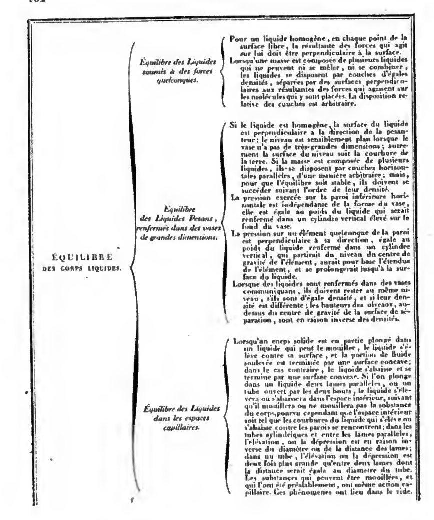
Le belier hydraulique est peu dispendieux, et sujet à peu de réparations ; à la vérité, il est nécessaire qu'il soit établi très-solidement ; mais on peut employer le plus petit filet d'eau en donnant au belier des dimensions convenables. D'après les expériences qui ont été faites, l'effet dynamique d'un belier est $\frac{67}{100}$ de la force motrice du courant qui le fait mouvoir ; on ne connaît aucune autre machine hydraulique qui transmette une portion aussi considérable du moteur (1).

(1) Le prix des beliers hydrauliques que construit maintenant M. Montgolfier fils est établi ainsi qu'il suit : un belier élevant 13 litres d'eau par minute à une hauteur double de celle de la chute qui sert de moteur, coûte 60 francs, et pour toutes autres conditions, le prix est proportionnel à l'effet produit : par exemple, si avec une chute d'eau d'un mètre, on voulait élever 52 litres d'eau par minute à une hauteur de 10 mètres, l'effet produit serait 20 fois plus grand, puisque la hauteur à laquelle l'eau doit être élevée est 5 fois plus grande que le double de la hauteur de la chute, et que la masse d'eau élevée est 4 fois plus grande que 13 ; le prix de cette machine serait donc de 20 fois 60 francs, ou de 1200 francs.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE IV.

Corps Liquides.

POROSITÉ.		Tous les corps liquides sont poreux, car leur volume varie en même temps que leur température.
DENSITÉ.		On détermine la densité des liquides de la même manière que celle des corps solides, en divisant le poids d'un liquide par celui d'un égal volume d'eau distillée à la température de 4°. On peut déterminer la densité d'un liquide : 1° en pesant successivement un flacon vide, plein d'eau et plein du liquide ; 2° en pesant successivement un corps dans l'air, dans l'eau et dans le liquide ; 3° par la quantité de fluide déplacé par un corps flottant. Les aréomètres du commerce n'indiquent que les différences de densité des liquides ; procédés au moyen desquels on pourrait construire ces instrumens de manière à leur faire indiquer les pesanteurs spécifiques. Dans tous ces procédés on commet une erreur due à ce que l'on n'opère point à la température de 4°.
PHÉNOMÈNES QUI RÉSULTENT DE LA STABILITÉ PLUS OU MOINS GRANDE D'ÉQUILIBRE ENTRE LES MOLÉCULES DES CORPS LIQUIDES.	*Compressibilité.*	Les corps liquides sont compressibles, puisqu'ils sont poreux, mais ils le sont très-peu ; d'après Perkins, l'eau, sous une pression de 100 atmosphères, se comprime de 1/30 de son volume.
	Élasticité.	Les molécules des corps liquides étant en équilibre stable entre les deux forces qui les sollicitent, il en résulte que les corps liquides étant compressibles, doivent être élastiques. C'est à leur élasticité que les liquides doivent la propriété de propager le son. Lorsque les liquides sont en petits globules, ils jouissent d'une élasticité due à la stabilité de leur forme.
	Viscosité.	Les molécules des corps liquides ne s'attirent pas exactement comme si elles étaient sphériques ; elles peuvent éprouver une certaine résistance à se mouvoir les unes autour des autres : c'est à cette résistance qu'on a donné le nom de Viscosité.
	Cohésion.	Les molécules des corps liquides étant en équilibre stable sous le rapport de leur distance, il faut, pour les séparer, employer une certaine force : cette résistance des molécules liquides à être séparées, porte le nom de Cohésion.
ÉQUILIBRE DES CORPS LIQUIDES.	*Principes sur lesquels sont fondées les lois de l'équilibre des Corps Liquides.*	On admet : 1° Que ces corps sont incompressibles ; 2° Que leurs molécules sont d'une mobilité parfaite ; 3° Qu'ils communiquent également dans tous les sens les pressions qui agissent en un point quelconque de leur surface.
	Équilibre d'une Masse Liquide qui n'est soumise à aucune action étrangère.	Lorsqu'une masse liquide dont les molécules s'attirent en raison inverse du carré de la distance, est abandonnée à elle-même, elle prend la forme sphérique. Lorsqu'une masse liquide sphérique tourne autour d'un axe passant par son centre, la masse s'aplatit aux pôles et se renfle à l'équateur. La forme sphérique des planètes provient de leur liquidité primitive, et leur aplatissement, de leur rotation.



ÉQUILIBRE DES CORPS LIQUIDES.	*Équilibre des Liquides soumis à des forces quelconques.*	Pour un liquidr homogène, en chaque point de la surface libre, la résultante des forces qui agit sur lui doit être perpendiculaire à la surface. Lorsqu'une masse est composée de plusieurs liquides qui ne peuvent ni se mêler, ni se combiner, les liquides se disposent par couches d'égales densités, séparées par des surfaces perpendiculaires aux résultantes des forces qui agissent sur les molécules qui y sont placées. La disposition relative des cuuches est arbitraire.
	Équilibre des Liquides Pesans, renfermés dans des vases de grandes dimensions.	Si le liquide est homogène, la surface du liquide est perpendiculaire à la direction de la pesanteur : le niveau est sensiblement plan lorsque le vase n'a pas de très-grandes dimensions ; autrement la surface du niveau suit la courbure de la terre. Si la masse est composée de plusieurs liquides, ils se disposent par couches horizontales parallèles, d'une manière arbitraire ; mais, pour que l'équilibre soit stable, ils doivent se succéder suivant l'ordre de leur densité. La pression exercée sur la paroi inférieure horizontale est indépendante de la forme du vase, elle est égale ao poids du liquide qui serait renfermé dans un cylindre vertical élevé sur le fond du vase. La pression sur un élément quelconque de la paroi est perpendiculaire à sa direction, égale au poids du liquide renfermé dans un cylindre vertical, qui partirait du niveau du centre de gravité de l'élément, aurait pour base l'étendue de l'élément, et se prolongerait jusqu'à la surface do liquide. Lorsque des liqoides sont renfermés dans des vases communiquans, ils doivent rester au même niveau, s'ils sont d'égale densité, et si leur densité est différente ; les hauteurs des oiveaox, au-dessus du centre de gravité de la surface de séparation, sont en raison inverse des densités.
	Équilibre des Liquides dans les espaces capillaires.	Lorsqu'un corps solide est en partie plongé dans un liquide qui peut le mouiller, le liquide s'élève contre sa surface, et la portion de fluide soulevée est terminée par une surface concave ; dans le cas contraire, le liqoide s'abaisse et se termine par une surface convexe. Si l'on plonge dans un liquide deux lames parallèles, ou un tube ouvert par les deux bouts, le liquide s'élèvera ou s'abaissera dans l'espace intérieur, suivant qu'il mouillera ou ne mouillera pas la substance du corps, pourvu cependant que l'espace intérieur soit tel que les courbures do liquide qui s'élève ou s'abaisse contre les parois se rencontrent ; dans les tubes cylindriques et entre les lames parallèles, l'élévation, ou la dépression est en raison inverse du diamètre ou de la distance des lames ; dans un tube, l'élévation ou la dépression est deux fois plus grande qu'entre deux lames dont la distance serait égala au diamètre du tube. Les substances qui peuvent être mooillées, et qui l'ont été préalablement, ont même action capillaire. Ces phénomènes ont lieu dans le vide.

ÉQUILIBRE DES CORPS LIQUIDES.

Équilibre des Liquides dans des espaces capillaires.

Tous ces phénomènes sont dus à une attraction des molécules liquides les unes pour les autres, et pour la substance des corps solides, attraction qui ne se manifeste qu'à de très-petites distances. Il résulte de l'attraction du liquide sur lui-même, que toutes les molécules qui forment la couche infiniment mince qui le termine, sont attirées de dehors en dedans avec une force qui est plus grande pour une surface convexe que pour une surface plane, et plus grande pour une surface plane que pour une surface concave. De cette inégalité d'action, on déduit facilement l'explication de l'élévation et de l'abaissement des liquides; et de la valeur de ces différences en fonction de la courbure de la surface, on déduit les lois numériques des effets capillaires.

Cette théorie conduit aussi très-simplement aux conditions d'équilibre d'une goutte liquide dans un tube cylindrique, et à son mouvement dans un tube conique, de même qu'à l'explication des attractions et des répulsions apparentes des corps flottans.

Cette théorie est fondée sur la forme concave ou convexe que prend le liquide autour des corps qui y sont plongés, suivant qu'ils peuvent ou non être mouillés. On démontre facilement par le raisonnement, qu'un corps liquide peut adhérer à un corps solide toutes les fois que son attraction pour ce corps est plus grande que la moitié de celle qu'il exerce sur les autres molécules liquides, et que toutes les fois que le liquide peut s'attacher contre un corps, il s'élève autour de lui, et que, dans le cas contraire, il se déprime.

ÉQUILIBRE DES CORPS FLOTTANS.

Lorsqu'un corps flottant est en équilibre, son poids est égal à celui du liquide déplacé, et le centre de gravité du corps est sur la même verticale que celui du fluide déplacé. Lorsqu'un corps flottant tourne autour d'une ligne qui reste constamment parallèle à elle-même, le corps passe successivement par des positions d'équilibre stable et instantané; si le centre de gravité du corps est au-dessous de celui du fluide déplacé, l'équilibre est stable dans tous les sens, mais cette condition n'est pas toujours nécessaire pour établir la stabilité.

MOUVEMENS DES LIQUIDES.

Mouvement d'une Masse Liquide pendant l'écoulement.

Mouvemens dans le reservoir.

Jusqu'à une distance de quelques centimètres de l'orifice, les molécules se meuvent verticalement; mais, dans le voisinage de l'orifice, les molécules se dirigent vers lui dans toutes les directions. Lorsque la hauteur du liquide au-dessus de l'orifice est seulement de quelques centimètres, si l'orifice est placé inférieurement, le liquide forme un entonnoir dont le centre répond au centre de l'orifice; si l'orifice est percé dans la paroi latérale, le liquide s'abaisse au-dessus de l'orifice.

MOUVEMENS DES LIQUIDES.

Mouvement d'une Masse Liquide, pendant l'écoulement.

Mouvemens hors du réservoir.

- La colonne liquide se contracte, après la sortie, par le défaut de parallélisme et l'inégalité de vitesse des molécules qui s'échappent. Le maximum de contraction a lieu à une distance de l'orifice égale à la moitié du diamètre de l'orifice ; la contraction est de 0,62 ; au delà de la contraction, la colonne s'effile, si le jet est vertical de haut en bas, et se gonfle, s'il est dirigé de bas en haut ; si le jet est incliné, la colonne liquide décrit une parabole. Dans tous les cas, la résistance de l'air finit par diviser la colonne en gouttes.
- Lorsque l'orifice est percé en mince paroi, la force motrice produite par l'écoulement, est égale à la pression que supportait la portion de la paroi qui a été supprimée ; elle est, par conséquent, proportionnelle à la hauteur du liquide dans le vase ; mais la vitesse de l'écoulement, ainsi que le volume du liquide écoulé, sont seulement proportionnels à la racine carrée de cette hauteur.
- Lorsque l'écoulement a lieu par des tuyaux additionnels, la dépense reste la même si le tuyau a la forme de la veine fluide jusqu'au maximum de contraction ; lorsqu'il est plus conique, la dépense est diminuée, et lorsqu'il l'est moins, qu'il est cylindrique ou évasé en dehors, la dépense est augmentée.
- Lorsqu'un liquide s'écoule par de longs tuyaux, la dépense est diminuée, si le tuyau est horizontal, et augmentée s'il est vertical. Il y a toujours une inclinaison sous laquelle la dépense reste la même que par un orifice en mince paroi. La pression sur les parois des tuyaux est positive lorsque la vitesse du liquide est diminuée ; elle est nulle, lorsqu'elle n'est pas altérée, et elle est négative lorsque la vitesse est augmentée.
- Si un liquide s'écoule de bas en haut, le jet tend à s'élever à la hauteur du liquide dans le réservoir ; mais il n'y parvient jamais, à cause du frottement dans l'ajutage, de la résistance de l'air et du choc du liquide qui retombe sur celui qui s'élève.

MOUVEMENS DES LIQUIDES.	*Mouvement d'une Masse Liquide pendant l'écoulement.*	*Mouvemens hors du réservoir*	L'écoulement des liquides par des canaux nuverts, n'a absolument aucune influence sur la dépeose, quelle que soit leue forme ; il s'écnule autant de liquide à une des extrémités, que l'autre en reçoit du réservoir ; en géoéral, pae toutes les tranehes du canal, il passe dans le même temps la même quantité de liquide ; pae conséquent, la vitesse du cnurant augmente lorsque le canal se rétréeit, et elle dimiuue lorsque le canal s'élargit.
	Mouvemens oscillatoires des Liquides.		Lorsqu'un liquide en équilibre dans on siphon renversé, est dérangé, il fait des nscillations qui suiveot les mêmes lois que celles d'un pendule. Loesq'nne masse liquide est en eepos, si on ébranle uo point quelconque de la surface, il se forme deux espèces d'ondes qui se propageot circulairement dans tons les sens autnue du point ébranlé ; les premières se propagent et leurs sommets s'abaissent avec une grande rapidité ; il est difficile de les nbservee ; les autres se propagent, s'abaissent moins rapidement et sont très-faciles à distinguer. Ces ondes se refléchissent cootre les nbstacles qui s'opposent à leur passage, et se reforment derrière ceox qui ne les nnt arrêtées qu'en partie ; elles se transmettent non-seulement à la surface, mais encnre dans l'intérieue de la masse, à une très-grande profondeur.
	Choc des Corps Liquides contre les Corps Solides.		La théorie et l'expérience ne sont pas d'accord en tout sue la manière de calculer l'effet du choc. L'expérience indique que le choc d'uo liquide contre un corps solide, immobile, on la résistaoce qu'éprouve uo corps solide en moovement dans un liquide en eepos, est proportinnnel à la densité du liquide, au carré de la vitesse ; qu'elle diminue à mesure que le corps se présente an liquide sous un angle plus aigu, et que la résistance croît avec une grande rapidité, lorsque le liquide est renfermé dans on canal étroit, doot la largeur diminue.
USAGE DES LIQUIDES POUR TRANSMETTRE ET MODIFIER LES FORCES.			Les liquides communiqnant la pressinn dans tnus les sens, il en résulte qu'nn liquide renfermé dans un vase peut servir à changer la direction ou l'intensité d'une force qui serait appliquée snr la snrface libre du liquide. Uo siphon renversé, plein d'eau, dont les deus branches sont verticales, de diametres inégaux et fermées pae des pistons, peut produire le même effet qu'un levier, dans lequel la puissance et la résistance seraient appliqoées à dea distances du point de rotation, dans le rapport inverse des surfaces des deux pistons. C'est une disposition semblable qui constitue la presse hydeaulique.
USAGE DES LIQUIDES COMME MOTLURS.			Un liquide qui se meut renferme une certaine quantité de monvement, qu'on peot faire passer en paetie dans une machine ; mais jamais en totalité. L'cao, comme force motrice, peut agir par pression, par impulsinn, on par l'un et l'antre ; le mode d'actino le plus avantageux est le premier. Descriptinn du belier hydraulique.

CHAPITRE V.

Des Corps gazeux.

§ Ier.

Constitution des Corps gazeux, et Phénomènes qui en résultent.

261. Les corps gazeux sont, comme nous l'avons déjà dit, des corps dans lesquels les molécules placées à une distance plus grande que le rayon d'affinité sensible, sont environnées d'atmosphères calorifiques dont la force répulsive est plus grande que leur attraction.

262. Avant d'examiner les propriétés des corps gazeux, nous établirons dans ces corps une distinction importante : il en est qui conservent leur état, quelle que soit la pression qu'on exerce sur eux et la température à laquelle on les soumette, et d'autres qui, pour conserver leur état gazeux, exigent que la pression ne soit pas plus considérable, et la température pas plus petite que lors de leur formation ; autrement ils retournent, du moins en partie, à l'état liquide : les premiers ont reçu le nom de Gaz Permanens ou simplement de Gaz : les autres sont désignés sous le nom de Vapeurs. Nous ne parlerons maintenant que des Gaz proprement dits.

263. De la nature et du rapport des forces qui agissent pour constituer les gaz, il résulte : 1° que les corps qui affectent cette forme sont pesans ; 2° qu'ils tendent continuellement à se dilater, puisque la force répulsive du calorique l'emporte sur l'attraction moléculaire, et qu'ils ne peuvent conserver le même volume que par la résistance des vases qui les renferment ou par leur pesanteur ; 3° qu'ils sont compressibles, puisque les molécules sont à distance ; 4° qu'ils sont élastiques, parce que nous savons que lorsqu'on diminue la distance des molécules, la force répulsive de la chaleur augmente plus rapidement que l'attraction ; 5° que les molécules des corps gazeux doivent être d'une mobilité extrê-

me ; enfin, 6° que les corps gazeux, en vertu de leur élasticité, doivent communiquer la pression dans tous les sens.

Pour vérifier si réellement tous les corps gazeux jouissent de toutes ces propriétés, il est indispensable d'examiner, d'abord, celles de l'air atmosphérique, attendu que c'est au milieu de sa masse que nous agissons toujours, que son influence est permanente, et qu'il est impossible de recueillir les autres gaz sans connaître les propriétés de celui-ci et les effets qui résultent de son accumulation autour de la terre.

A. *Air atmosphérique.*

264. *Pesanteur de l'Air.* La matérialité et, par conséquent, la pesanteur de l'air, est une conséquence nécessaire de la résistance qu'il oppose au mouvement, et de ce que l'air peut communiquer sont mouvement; mais on peut facilement reconnaître la pesanteur et déterminer le poids de l'air par l'expérience suivante : A (*fig.* 149) est un ballon de verre, d'une capacité connue, garni d'une virole à robinet B ; on pèse le ballon plein d'air, ensuite, par des moyens que nous indiquerons plus tard, on enlève l'air qu'il renferme ; en pesant de nouveau le ballon, on trouve qu'il a diminué de poids, et en divisant la perte de poids par le nombre de litres que contient le ballon, on peut en déduire exactement le poids d'un litre d'air. En faisant cette expérience à différentes températures et dans différens états de l'atmosphère, on trouve que le poids de l'air varie. Nous verrons aussi que ce poids dépend de la pression de l'atmosphère et de la température.

265. *L'Air est compressible et élastique.* On peut facilement démontrer que l'air jouit de cette double propriété, en pressant une vessie pleine d'air : ce gaz cède à la pression, diminue de volume et revient à son volume primitif aussitôt que la pression cesse d'agir. C'est en vertu de cette élasticité que les ballons à vessies pleines d'air bondissent sur les corps solides qu'ils viennent choquer.

266. *L'Air communique la pression dans tous les sens.* Cette propriété de l'air peut être mise en évidence de bien des manières différentes :

lorsqu'une vessie, en partie pleine d'air, est pressée sur un des points de sa surface, elle se gonfle sur tous les autres; lorsque l'on fait arriver un courant d'air dans un tube dont la partie inférieure est percée de petits orifices dans toutes les directions, l'air s'écoule par tous, perpendiculairement à la direction de la paroi. Ainsi, quand l'air est renfermé dans un vase, et qu'on exerce sur lui une pression quelconque, elle se transmet sur tous les points du vase perpendiculairement à la direction des parois.

Lorsqu'un vase est plein d'air, indépendamment des pressions provenant de la force élastique de l'air, et de celles qui sont dues aux forces étrangères qui agissent sur certaines parties de la masse, chaque point de la surface éprouve encore une pression due au poids de l'air, et qui dépend de la distance de ce point à la partie supérieure du vase; mais cette dernière pression est si petite, qu'on peut presque toujours la négliger.

Les pressions qui ont lieu contre la paroi intérieure d'un vase plein d'air, se détruisent mutuellement, et ne peuvent imprimer au vase aucun mouvement : mais il n'en serait pas ainsi si l'air pouvait s'échapper par un petit orifice; la pression opposée à la direction de l'écoulement, n'étant plus détruite par la résistance de la portion de la paroi supprimée, obtiendrait tout son effet, et le vase serait entraîné en sens contraire de l'écoulement. Ce phénomène est analogue à celui que nous avons reconnu pour les corps liquides (pag. 129); on pourrait facilement le vérifier au moyen d'un appareil semblable.

267. *L'Air tend à se dilater.* Lorsque l'air est renfermé dans un vase ouvert, plongé dans l'atmosphère, il conserve exactement son volume, parce que l'air extérieur possède une force expansive égale à la sienne et qui la détruit. Mais si le vase ayant des parois qui puissent résister à la pression de l'air extérieur, se trouvait fermé de toute part, de manière à soustraire le fluide intérieur à l'action de celui qui est extérieur, en augmentant la capacité du vase, l'air intérieur se dilaterait à mesure, de manière à occuper toujours la totalité de l'espace dans lequel il peut se développer; en même temps, sa force expansive décroîtrait, et le vase se trouverait plus comprimé par l'air extérieur; de sorte

que, si une portion de la paroi était rendue mobile après la dilatation de l'air intérieur, cette partie mobile serait refoulée vers l'intérieur avec une force d'autant plus considérable que l'air intérieur aurait été plus dilaté. On peut constater ce que nous venons d'énoncer au moyen de l'appareil (*fig.* 150) : A B est un tube cylindrique dans lequel se meut le piston *m* ; C est un robinet fixé à l'extrémité du tube : lorsque le robinet est ouvert, il est facile de faire mouvoir le piston dans tous les sens, parce que l'air peut librement entrer ou sortir ; mais si l'on ferme le robinet, on éprouve une résistance croissante pour abaisser ou pour élever le piston, parce que dans le premier cas l'air se comprime et que sa force élastique augmente, et dans le second, parce que l'air qui est renfermé sous le piston se dilate, et que sa force élastique devient plus petite que celle de l'air qui est en contact avec la partie supérieure du piston.

268. *Atmosphère.* L'atmosphère est la masse d'air qui environne la terre de tout côté, et dans laquelle sont plongés tous les corps qui sont à sa surface ; ses différentes propriétés sont des conséquences nécessaires de celles que nous avons reconnues dans les portions limitées de l'air qui le constitue. Nous allons les examiner successivement.

L'atmosphère tourne avec la terre ; car, s'il n'en était pas ainsi, nous éprouverions, par l'air en repos, une résistance égale au choc qui aurait lieu si la terre était immobile, et si l'atmosphère avait un mouvement égal et opposé, il en résulterait un courant d'air permanent dont la vitesse à l'équateur serait à peu près de 4630 mètres par seconde, tandis que dans les ouragans les plus violens qui déracinent les arbres, et renversent les édifices, la vitesse du vent n'est que de 45 mètres par seconde. L'atmosphère se mouvant avec la terre, toutes les molécules qui le constituent sont sollicitées par deux forces, la pesanteur, qui les fait tendre vers le centre de la terre, et la force centrifuge, qui tend à les écarter de l'axe de rotation. Or, comme à mesure qu'une molécule s'éloigne de l'axe de rotation, sa pesanteur diminue et sa force centrifuge augmente, il existe nécessairement, sur la direction de chaque verticale de la terre, une distance à laquelle ces deux forces sont égales, et qu'une

molécule ne peut pas dépasser, sans être lancée par la force centrifuge hors du système terrestre. Ainsi, l'atmosphère est limité.

Pour déterminer la surface limite de l'atmosphère, il faudrait, indépendamment de la pesanteur et de la force centrifuge des molécules d'air, avoir égard à leur force élastique, qui décroît avec une grande rapidité à mesure que les molécules sont plus éloignées de la surface de la terre. Il résulte de la nature des forces qui sollicitent les molécules de l'air, 1° que la limite de l'atmosphère doit être une surface de révolution, ayant pour axe celui de rotation de la terre, puisque toutes ces forces sont symétriques autour de cet axe; 2° que l'épaisseur de l'atmosphère doit être beaucoup plus petite sous l'équateur que sous tous les autres parallèles, parce que, à la même distance de la terre, la force centrifuge y est plus grande qu'à toute autre latitude donnée, et qu'à l'équateur la force centrifuge est opposée à la pesanteur, tandis que partout ailleurs elle lui est oblique; 3° que sous les pôles, où il n'existe pas de force centrifuge, l'atmosphère doit s'élever à une très-grande hauteur. La forme de la limite extérieure de l'atmosphère doit être celle indiquée dans la fig. 151.

269. L'air étant pesant, compressible, élastique et communiquant la pression dans tous les sens, il en résulte que si l'on conçoit la portion de l'atmosphère située au-dessus d'une partie quelconque de la surface de la terre, divisée en couches horizontales infiniment minces, chacune de ces couches sera pressée par le poids de toutes celles qui sont au-dessus d'elle, et transmettra cette pression à toutes celles qui sont au-dessous; par conséquent, la densité de ces couches et leur force élastique iront en décroissant à partir de la surface de la terre, et la force élastique de chacune d'elles, force produite par le poids de celles qui lui sont supérieures, se transmet dans tous les sens possibles.

Ainsi, lorsqu'un corps est plongé dans l'air, il éprouve sur tous les points de sa surface extérieure, et dans tous les sens, une pression qui est d'autant plus petite qu'il est à une plus grande hauteur.

B. *Propriétés générales des Gaz.*

270. *Procédé pour recueillir les Gaz.* Il y a quelques gaz qui existent dans la nature, séparés de l'air atmosphérique : tel est principalement l'acide carbonique que l'on trouve dans certaines grottes des terrains volcaniques; il reste à la surface du sol, parce que sa densité est beau-

coup plus considérable que celle de l'air : pour le recueillir, il suffit de vider, dans l'espace qu'il occupe, un vase plein d'eau, et de le fermer avant de l'en sortir ; l'eau en s'échappant cède sa place au gaz. Mais la plupart des autres gaz, qui maintenant sont très-nombreux, se dégagent en faisant réagir certains corps les uns sur les autres : pour les recueillir parfaitement purs, on emploie les procédés que nous allons décrire : soit M (*fig.* 152) un vase renfermant les substances qui, par leur action réciproque, doivent donner naissance à un gaz ; on adapte à l'orifice du vase un bouchon à travers lequel passe un tube recourbé *a b c d*, dont l'extrémité *d* plonge dans un vase plein d'eau, et s'engage au-dessous d'une cloche N pleine du même liquide. Le liquide qui remplit le vase P Q et la cloche N, est de l'eau, lorsque le gaz n'est point soluble dans ce liquide, et du mercure, lorsque le gaz est soluble dans l'eau, et n'attaque point le mercure. Pour remplir la cloche N du liquide, on la tient renversée au-dessous du niveau, on la retourne, on la soulève sans que les bords de son ouverture dépassent ce niveau, ensuite on la glisse sur le support *m n* ; la pression de l'atmosphère qui agit sur la surface libre du liquide renfermé dans le vase P Q, maintient le liquide dans la cloche ; mais il faut que la hauteur de la cloche n'excède pas 32 pieds, si le liquide est de l'eau, ou 28 pouces, si c'est du mercure, attendu qu'une colonne d'eau de 32 pieds et une colonne de mercure de 28 pouces font équilibre à la pression de l'air, comme nous le verrons bientôt. L'appareil ainsi disposé, on fait dégager le gaz du vase M, ou en faisant chauffer, ou en y introduisant la substance qui doit déterminer sa formation : le gaz s'échappe à l'extrémité du tube, en bulles plus ou moins volumineuses qui passent à travers l'orifice du support *m n*, gagnent le sommet de la cloche, et font descendre un égal volume de liquide. Au commencement, le gaz est mêlé avec l'air qui était renfermé dans l'appareil ; aussi on laisse perdre les premières portions qui se dégagent, et on ne met la cloche N dans la direction de l'écoulement du gaz que quand on est sûr que la totalité de l'air qui était renfermé dans l'appareil a été chassé. Lorsqu'un gaz est renfermé sous une cloche, on peut facilement le faire passer dans une autre cloche ou dans un flacon ;

pour cela, il faut le remplir d'eau, le poser sur une tablette *m n* (*fig.* 153), au-dessus d'un orifice garni inférieurement d'un entonnoir renversé, et on incline sous l'entonnoir la cloche qui renferme le gaz; on peut alors fermer le vase sous l'eau, et le sortir de la cuve pour le soumettre à différentes épreuves (1).

271. *Propriétés des Corps gazeux.* Lorsqu'un gaz a été recueilli sur le mercure, desséché par le contact de certaines substances qui ont une grande affinité pour l'eau, et qu'il a été introduit dans le ballon A (*fig.* 149), après en avoir enlevé l'air par une machine que nous ferons bientôt connaître, ou en le remplissant de mercure, et y faisant passer le gaz sur la cuve, on trouve que le ballon pèse plus lorsqu'il est plein d'un gaz quelconque, que lorsqu'il est vide, et que cette différence, dans les mêmes circonstances, varie avec la nature du gaz. Nous devons conclure de ces expériences, que tous les gaz sont pesans, et qu'ils le sont inégalement.

Si dans l'appareil (*fig.* 150) on enfonce le piston jusqu'à l'extrémité B du corps de pompe, et si on adapte le robinet C à l'orifice du ballon A plein d'un gaz quelconque (*fig.* 149), en soulevant le piston, après avoir ouvert les deux robinets, une partie du gaz passera au-dessous du piston, et si, après avoir fermé les robinets, on fait mouvoir le piston, on observera les mêmes phénomènes que pour l'air atmosphérique. Ainsi tous les gaz sont compressibles, élastiques, et tendent indéfiniment à se dilater. On a reconnu de la même manière que tous les gaz connus communiquent également la pression dans tous les sens, et ne peuvent jamais repasser à l'état liquide, ni à plus forte raison à l'état solide, quels que soient la pression et le froid.

272. Lorsqu'un corps gazeux est en équilibre, il est très-important de savoir déterminer, 1° sa force élastique, 2° le rapport qui existe entre son volume et sa force élastique.

---

(1) Lorsqu'un gaz a une densité beaucoup plus grande ou beaucoup plus petite que celle de l'air, on pourrait le recueillir dans une cloche pleine d'air dont l'ouverture serait placée en haut ou en bas, pourvu que l'on fit arriver le tube jusqu'au fond de la cloche; mais, par ce moyen, il est bien difficile d'obtenir le gaz parfaitement pur, du moins, il faudrait pour cela en perdre une grande quantité.

C. *Détermination de la force élastique des Gaz.*

273. Nous nous occuperons d'abord de l'atmosphère : l'atmosphère, comme nous l'avons déjà dit, est une masse d'air qui environne la terre de toute part, et qui est maintenue en équilibre par la pesanteur, sa force élastique et la force centrifuge ; nous avons vu aussi que la densité et la force élastique d'une couche d'air croissent à mesure que sa distance à la surface de la terre diminue.

274. *Mesure de la force élastique de l'Air atmosphérique.* Si l'on prend un tube de verre (*fig.* 154), fermé par une extrémité, et si après l'avoir rempli de mercure, bouché avec le doigt, et renversé dans un vase plein de mercure, on enlève le doigt, le tube reste plein, si sa hauteur au-dessus du niveau extérieur est moindre que $0,^m76$ (28 pouces); mais si la longueur du tube est suffisante, quelque grande qu'elle soit d'ailleurs, le mercure descend dans le tube, et sa surface reste à une hauteur de $0,^m76$. Si, au lieu de remplir le tube de mercure, on le remplit d'eau, la colonne se maintient à environ 32 pieds ; si c'est de l'acide sulfurique, la hauteur est d'environ 16 pieds. La hauteur reste la même pour le même liquide, quelles que soient d'ailleurs la forme et les dimensions du tube (pourvu toutefois qu'il ne soit pas d'un très-petit diamètre, car il y aurait alors une diminution ou une augmentation de hauteur due à la capillarité). Or, ces hauteurs auxquelles les différens liquides restent suspendus, sont précisément en raison inverse de leur densité, et toutes ces colonnes liquides ont exactement le même poids : par exemple, la densité du mercure étant 13,56, une colonne de mercure de 28 pouces a le même poids qu'une colonne d'eau de 32 pieds. Il résulte de là, que c'est une même force qui soutient les liquides dans les tubes dont nous venons de parler ; en effet, il est facile de voir que cette force ne peut être que la pression de l'air, car nous avons déjà reconnu l'existence de cette pression ; elle doit donc se manifester sur la surface libre du liquide renfermé dans la cuvette A B, et la presser verticalement de bas en haut ; si on conçoit alors que le liquide intérieur soit au même niveau,

comme les liquides communiquent la pression dans tous les sens, et que le tube étant exactement privé d'air, la surface du liquide renfermé dans ce tube n'éprouve aucune pression, la colonne liquide devra s'élever jusqu'à ce que son poids fasse équilibre au poids de l'atmosphère. Cette expérience a été faite pour la première fois par Toricelli, élève de Galilée; et l'appareil que nous venons de décrire porte son nom. Pascal, pour rendre encore l'expérience de Toricelli plus convainquante, et pour mettre tout-à-fait hors de doute l'existence de la pression de l'air, chargea un de ses amis de monter sur le sommet du Puy-de-Dôme avec un tube de Toricelli, pour vérifier si le mercure s'abaisserait dans le tube à mesure que l'on s'élèverait : il est évident que cela devait être, si réellement c'est la pression de l'air qui soutient ce métal, puisque l'instrument était déchargé du poids de toutes les couches inférieures. L'expérience se trouva parfaitement d'accord avec ce que Pascal avait prévu.

Ainsi le tube de Toricelli est un appareil que l'on peut employer pour mesurer la pression de l'atmosphère; cette pression est égale au poids de la colonne liquide soulevée. On pourrait employer un liquide quelconque, mais le mercure est préféré, parce que, pour tous les autres, le tube devrait avoir une longueur qui serait trop embarrassante, et de plus, parce que les vapeurs qu'ils émettent à la température ordinaire, en se réunissant au-dessus de la colonne, détruiraient une partie de la pression de l'air, qui varierait avec la température; tandis que les vapeurs mercurielles, dans les limites des températures ordinaires, n'ont qu'une force élastique tellement petite qu'on peut toujours la négliger. Le tube de Toricelli porte le nom de Baromètre. Comme cet appareil est d'une très-haute importance dans toutes les recherches physiques, nous examinerons avec soin sa construction et les différentes modifications qu'on lui a fait éprouver.

275. Pour établir un appareil semblable à celui de la figure 154, dont les indications soient comparables entre elles, il faut d'abord que le mercure ne soit allié avec aucun autre métal; afin qu'il n'adhère pas contre les parois du verre, et qu'il se meuve librement, et, enfin, que le tube et le mercure soient parfaitement privés d'air et de vapeurs d'eau,

car l'air et l'eau gagneraient la partie supérieure, et, par leur force élastique, feraient baisser la colonne.

Pour séparer le mercure des métaux étrangers qu'il peut renfermer, on le distille dans une cornue de grès ou de fer. Pour le purger d'air et d'eau, il suffit de le faire bouillir ; mais pour enlever l'air et la vapeur qui baignent les parois du tube, on commence par y introduire quelques pouces de mercure, et on le fait chauffer ; l'eau réduite en vapeur et l'air dilaté forment des bulles très-visibles qui restent adhérentes au tube, mais qu'une ébullition de quelques minutes dégage facilement. Lorsque cette première portion du mercure est parfaitement nette, on en introduit une seconde que l'on fait bouillir à son tour, et on continue jusqu'à ce que le tube soit plein ; alors on le laisse refroidir, on achève de le remplir par du mercure récemment bouilli, on le ferme avec le doigt, et on le renverse dans la cuvette ; souvent on donne à la cuvette un orifice beaucoup plus étroit (*fig.* 155) ; quelque fois aussi la cuvette est fixée au tube (*fig.* 156).

Lorsque l'appareil a été rempli de mercure, il ne reste plus qu'à fixer contre le tube une échelle divisée en pouces et en lignes, ou en centimètres et en millimètres, et dont le zéro correspond au niveau du mercure dans la cuvette. La graduation de l'échelle devant être d'une grande précision, il faudra, pour l'exécuter, prendre avec un compas à verge la longueur d'un décimètre sur un bon étalon, la porter sur une ligne de l'échelle à partir du zéro, et obtenir les centimètres et les millimètres au moyen de la machine à diviser que nous avons décrite (6).

176. Un baromètre construit avec beaucoup de soin, par les procédés que nous venons d'indiquer, présente encore, dans son usage, plusieurs causes d'erreur qu'il est important de connaître, afin de les détruire par une meilleure disposition de l'appareil, ou du moins afin de pouvoir en calculer les effets, pour ensuite en corriger les résultats : ces causes d'erreur sont au nombre de trois : 1° les variations de niveau du mercure dans la cuvette, 2° la capillarité, 3° la variation de poids du mercure provenant des changemens de température.

177. Lorsque par une cause quelconque le mercure monte et descend



ronné d'un tube de cuivre sur lequel est tracé la division ; ce tube est percé d'une rainure destinée à laisser apercevoir la colonne de mercure ; dans cette rainure se meut verticalement, au moyen d'un pignon qui s'engage dans une crémaillère fixée sur les bords, un curseur garni d'un vernier (5) ; son extrémité, qui est parfaitement horizontale, doit être amenée à la hauteur du point culminant de la colonne de mercure ; mais comme pour remplir exactement cette dernière condition, il faut que l'œil soit à la hauteur du sommet de la colonne, et qu'il est impossible de s'en assurer directement, ce tube est percé d'une seconde rainure opposée à la première, dans laquelle le curseur entraîne une plaque dont le bord supérieur horizontal reste dans le même plan que le bord du curseur : il est facile alors de mettre le bord du curseur à la hauteur du sommet de la colonne ; car, il suffit pour cela d'amener les deux mires et le sommet de cette colonne dans un même plan. Le baromètre de Fortin se suspend comme les boussoles de navire, à deux anneaux concentriques mobiles dans des axes perpendiculaires : lorsqu'on veut transporter cet instrument, on fait monter la vis, le mercure s'élève dans le tube et le remplit exactement ; alors l'instrument peut être renversé et agité sans que le mercure produise dans l'intérieur des chocs capables de le briser, car tout est plein, et sans que le mercure en sorte, car la cuvette est fermée supérieurement par une peau assez poreuse pour permettre à l'air de s'introduire, mais trop peu pour laisser filtrer le mercure.

278. Lorsque le tube d'un baromètre a un diamètre capillaire, la colonne de mercure qu'il renferme est terminée par une surface convexe : il en résulte une force verticale, dirigée du haut en bas, qui s'ajoute au poids de la colonne pour balancer le poids de l'atmosphère ; par conséquent, sous la même pression atmosphérique, la hauteur du baromètre sera d'autant plus petite que le tube sera plus capillaire. On peut éviter cette cause d'erreur dans les baromètres à cuvette, en prenant des tubes d'un gros calibre, et dans les baromètres à siphon, en donnant aux deux branches des diamètres égaux (*fig.* 158) ; en effet, si la branche la plus courte qui sert de cuvette a un diamètre parfaitement égal à

celui de la branche la plus longue, la capillarité des deux branches produira deux forces verticales qui se détruiront mutuellement ; mais pour se servir de cet appareil, il faudrait mesurer à chaque fois la hauteur du mercure dans le tube et dans la cuvette, et retrancher cette dernière de la première. Lorsqu'un baromètre est affecté par la capillarité, on peut très-facilement corriger l'erreur qui en résulte, quand on connaît le diamètre intérieur du tube, au moyen de la table suivante.

TABLE des Dépressions du Mercure dans le Baromètre dues à la capillarité.

DIAMÈTRE INTÉRIEUR EN MILLIMÈTRES.	DÉPRESSION EN MILLIMÈTRES.	DIAMÈTRE INTÉRIEUR EN MILLIMÈTRES.	DÉPRESSION EN MILLIMÈTRES.
2	4,5590	11	0,3506
3	2,9023	12	0,2602
4	2,0388	13	0,2047
5	1,5055	14	0,1597
6	1,1482	15	0,1245
7	0,8813	16	0,0970
8	0,6851	17	0,0754
9	0,5354	18	0,0586
10	0,4201	19	0,0430
		20	0,0351

279. M. Gay-Lussac a fait au baromètre à siphon une modification importante qui le rend très-portatif et d'un usage très-commode. Le baromètre de M. Gay-Lussac est composé de deux tubes A B et C D (*fig.* 159) de même calibre, et réunis par un troisième très-capillaire B D : les deux premiers sont exactement fermés à leur partie supérieure, la cuvette est seulement percée vers son sommet d'une petite ouverture très-capillaire *o* ; le tube et la cuvette ont même diamètre intérieur, afin que leurs actions capillaires se détruisent mutuellement ; le tube B D est d'un très-petit diamètre, afin que quand l'instrument est renversé (*fig.* 160), le mercure reste suspendu au point D par sa capillarité ; la cuvette est fermée à son extrémité, afin que si par l'agitation il y tombait quelques gouttes de mercure lorsque l'appareil est renversé, il ne puisse pas en sortir ; enfin, l'ouverture *o* est destinée à laisser entrer l'air dans la cuvette ; mais son diamètre est très-petit pour que le mercure ne puisse pas s'échapper. Ce baromètre est garni de deux échelles, l'une pour la

cuvette, l'autre pour le tube ; mais au lieu de placer l'origine commune des deux divisions au-dessous du niveau de la cuvette, ce qui exigerait à chaque opération de retrancher la hauteur du mercure dans la cuvette de celle du tube, les deux échelles partent d'une ligne intermédiaire $p\,q$; de sorte qu'il suffit d'ajouter les indications des deux échelles pour avoir la différence de niveau du mercure dans les deux tubes. Cet appareil se place dans une canne ou sur un plateau ; on le transporte avec la plus grande facilité, lorsqu'il est renversé ; il est très-léger, peu volumineux, et n'est affecté par aucune des deux causes d'erreur que nous avons signalées.

280. Enfin, tous les baromètres, quelle que soit d'ailleurs leur construction, ne peuvent donner des indications comparables entre elles, qu'autant que les observations ont été faites à des températures parfaitement égales, ou du moins y ont été ramenées ; car le mercure se dilatant par le chaleur, comme tous les autres corps, une colonne de mercure de même longueur a des poids différens à des températures inégales : par exemple, si la pression atmosphérique restant la même, la température augmentait, le baromètre monterait.

Pour ramener les hauteurs barométriques à ce qu'elles auraient été si la température eût été constante, nous sommes obligé d'anticiper sur des faits qui ne doivent être développés que dans la suite. Nous démontrerons plus tard que le mercure se dilate uniformément, du moins entre zéro et 100 degrés, et que pour chaque degré du thermomètre centigrade, la dilatation est de $\frac{1}{5550}$ de son volume à zéro ; il est facile, d'après cela, de calculer la longueur d'une colonne de mercure à zéro, lorsqu'on la connaît à une température déterminée ; en effet, soit h la hauteur observée à la température t, et h' la hauteur de cette colonne à la température de zéro ; il est évident, d'après la loi de dilatation que nous venons d'énoncer, que $h = h'\left(1+\frac{1}{5550}\right)$ d'où l'on tire $h' = \frac{h}{1+\frac{t}{5550}}$. Par exemple, si à la température de 50 degrés la hauteur du baromètre était de $0,^{m}75$, pour déterminer la hauteur de la colonne de mercure à la température de la glace fondante, il faudrait, dans la formule précédente, faire $h = 0,75$, et $t = 50$, ce qui donnerait $h' = 0,7433$.

281. *Usages du Baromètre.* Les usages du baromètre sont très-multipliés ; c'est au moyen de cet instrument que l'on détermine la force

élastique de tous les gaz et des vapeurs qui sont renfermées dans des vases clos ; mais on se sert plus ordinairement du baromètre pour prévoir les changemens qui doivent survenir dans l'atmosphère, et pour mesurer les hauteurs des montagnes.

282. Dans un même lieu de la surface de la terre, le baromètre éprouve des variations continuelles ; les unes sont diurnes et périodiques ; les autres, purement accidentelles paraissent dépendre de l'état de l'atmosphère. Dans nos climats, le baromètre atteint son maximum à 9 heures du matin et à 11 heures du soir, et son minimum à 4 heures du soir et du matin. Ce mouvement régulier du baromètre ne peut s'observer que dans les jours qui sont très-calmes, autrement les variations produites par celles de l'atmosphère font disparaître cette régularité ; mais sous les tropiques où les causes perturbatrices sont plus constantes, les mouvemens du baromètre sont si réguliers que, suivant M. de Humbolt, on peut prédire l'heure par l'inspection du baromètre. La cause du mouvement diurne du baromètre est complétement inconnue ; mais celles qui produisent les anomalies brusques paraissent résider dans les changemens qu'éprouve l'atmosphère. On a observé qu'en général le baromètre monte lorsqu'il doit faire beau temps, et qu'il descend lorsqu'il doit pleuvoir, et surtout lorsqu'il doit se former un orage ; nous disons en général, car on a remarqué que la loi que nous venons d'énoncer était quelquefois en défaut. Lors de l'invention des baromètres on croyait que la colonne métallique devait monter lorsque l'air est humide, et descendre lorsqu'il est sec, parce que dans le premier cas l'instrument était pressé, et par le poids de l'atmosphère, et par celui de la vapeur d'eau ; mais l'observation n'a point confirmé cette induction, comme nous venons de le dire ; la raison en est que la vapeur d'eau est plus légère que l'air. La plupart des baromètres qui ne doivent pas changer de lieu portent sur leur division les indications des hauteurs correspondantes aux différens états de l'atmosphère : il faut se garder de leur accorder trop de confiance, elles sont quelquefois en défaut.

On donne souvent aux baromètres qui sont uniquement destinés à indiquer l'état de l'atmosphère, une forme tout-à-fait différente de

celles que nous avons déjà décrites et qu'il est bon de connaître ; cet appareil (*fig.* 161) est composé d'un cadran solide M N, derrière lequel est fixé le baromètre à siphon A B C D ; la cuvette C D est cylindrique et d'un petit diamètre ; sur la surface du mercure qui y est renfermé repose un flotteur *a*, fixé à un fil de soie qui s'enroule sur une petite poulie très-mobile *b*, et qui est tendu par un contre-poids *c* : à la poulie est fixée une aiguille *b d* qui se meut sur la partie antérieure du cadran ; lorsque le mercure monte ou descend dans le tube A B, il descend ou monte dans la cuvette, et comme il entraîne avec lui le flotteur, la poulie tourne, et fait mouvoir l'aiguille avec elle.

283. Au niveau de la mer, la hauteur moyenne du baromètre est d'environ 0,^{m}76 ; mais lorsque par un temps calme on porte cet instrument dans différens lieux inégalement élevés au-dessus de la mer, la colonne s'abaisse d'autant plus que le lieu est plus élevé : par exemple, d'après les observations de Saussure, au sommet du Grand-Saint-Bernard, le baromètre ne s'élève qu'à 0,^{m}57 ou 21 pouces. Dans le voyage aérostatique de M. Gay-Lussac, le baromètre descendit à 0,^{m}32. L'abaissement du mercure dans le baromètre à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère avait été prévue par Pascal (174). La hauteur de la colonne barométrique étant liée à la distance verticale de l'instrument au niveau de la mer, on conçoit qu'il doit être possible de déterminer les hauteurs des montagnes par des observations barométriques. Si l'atmosphère avait une densité uniforme, la solution du problème en question serait d'une facilité extrême ; en effet, on a trouvé que la densité du mercure est 10463 fois plus grande que celle de l'air à la surface de la terre ; il en résulte que la colonne d'air d'une densité uniforme qui fait équilibre à une colonne de mercure de 0,^{m}76, aurait 7961,^{m}88 de hauteur, et qu'un abaissement d'un millimètre dans le baromètre correspondrait à une hauteur de 10,^{m}463 ; par conséquent, il suffirait de multiplier par ce dernier nombre l'abaissement du mercure en millimètres pour obtenir la différence de hauteur : mais la densité de l'atmosphère décroît suivant une loi très-compliquée, car elle dépend de la température, de l'intensité de la pesanteur et de la force centrifuge, élémens qui sont très-variables. M. Laplace est

parvenu, en ayant égard à toutes les causes qui font varier la densité de l'atmosphère, à une formule très-simple, au moyen de laquelle on peut trouver la différence de hauteur de deux lieux dans lesquels on connaît pour le même instant les hauteurs barométriques, ainsi que les températures.

En désignant par X la différence de hauteur, par H et h la hauteur du baromètre dans les deux stations, ramenées à la même température ; par T et t les températures de l'air, et par ψ la latitude, on a

$$X = 18393 \left(1 + 0{,}002837 \cos. 2\psi\right)\left(1 + 2.\frac{T+t}{1000}\right) \text{Log.} \left(\frac{H}{h}\right).$$

Le coefficient constant 18393 a été déterminé par l'expérience. D'après cette formule, on a calculé des tables qui sont d'un usage très-commode ; les plus simples et les plus exactes sont celles de M. Oltemanns, imprimées dans l'Annuaire du bureau des longitudes.

284. *Mesure de la force élastique d'un Gaz renfermé dans un appareil clos.* Lorsqu'un gaz est contenu dans un vase fermé de toute part (*fig* 162), on peut mesurer directement sa force élastique, lorsque le vase contient un baromètre ; mais lorsque le gaz est renfermé sous une cloche, reposant sur l'eau ou sur le mercure, on peut mesurer sa force élastique d'une manière très-simple ; en effet, soit ABCD, (*fig.* 163) une cloche renfermant un certain volume ABMN de gaz, il est évident que la colonne liquide MNCD soutient une partie du poids de l'atmosphère qui presse la surface libre extérieure du liquide ; par conséquent, le gaz n'est réellement pressé que par le poids de l'atmosphère, moins le poids de la colonne liquide MNCD : ainsi, par exemple, si le liquide est du mercure, le baromètre étant à 0,^{m}76, et MD étant de 10 centimètres, la force élastique du gaz serait représentée par le poids d'une colonne de mercure de 0,66 ; si le liquide était de l'eau, pour avoir la pression estimée en poids de mercure, il faudrait, de la hauteur du baromètre, retrancher la hauteur de la colonne d'eau ND divisée par la densité du mercure. Si le niveau intérieur MN était sur le prolongement du niveau extérieur, il est évident que le gaz supporterait exactement la pression de l'air extérieur ; et enfin, si le niveau MN était au-dessous du niveau extérieur (*fig.* 164), le gaz supporterait la pression de l'atmosphère, plus le poids d'une colonne liquide dont

la hauteur serait égale à la différence des niveaux ; par conséquent, la pression supportée par le gaz serait représentée par la hauteur du baromètre, plus la hauteur N D, si le liquide était du mercure, ou augmentée de cette hauteur divisée par la densité du mercure, si le liquide était de l'eau.

D. *Rapport du Volume et de la Force élastique des Gaz.*

285. Nous avons reconnu que toutes les fois qu'un gaz est comprimé, il diminue de volume, et que la force élastique croissant avec la densité, il arrive bientôt à un état de condensation où sa force élastique est égale à la pression exercée ; mais nous ne connaissons pas encore les lois que suivent ces accroissemens de densité et de force élastique.

286. *Loi de Mariote.* L'appareil dont on se sert pour déterminer les forces élastiques des gaz sous différens volumes, est composé d'un tube A B C D (*fig.* 165), fermé en D et ouvert en A ; la partie D C de ce tube est exactement cylindrique, et les deux branches D C et A B sont accompagnées d'échelles divisées en centimètres et millimètres, à partir d'une même ligne horizontale. Pour opérer sur l'air, on commence par introduire dans le tube une petite quantité de mercure pour séparer l'air renfermé dans le tube D C de celui qui est contenu dans le tube A B ; mais de manière à ce que le liquide dans les deux branches du siphon soit au même niveau, afin que la colonne d'air D C ne soit pressée que par l'atmosphère ; alors on mesure exactement sa longueur, et on introduit dans le tube A B une quantité de mercure telle que la différence du niveau du métal dans les deux tubes soit égale à la hauteur du baromètre ; on observe alors que la colonne d'air D C est deux fois plus petite, et en général, que si la différence de niveau du mercure est égale à un nombre quelconque de fois la hauteur du baromètre, la longueur de la colonne d'air est égale à sa longueur primitive divisée par ce nombre augmenté de l'unité ; or, le tube C D étant cylindrique, le volume d'air qui y est renfermé est proportionnel à la longueur de la portion du tube qu'il occupe ; et comme le tube A B est ouvert, il s'ensuit que l'air contenu dans le tube D C

est pressé par l'atmosphère, plus par le poids du mercure renfermé dans le tube A B au-dessus du niveau de ce liquide dans le tube C D : donc le volume de l'air est en raison inverse de la pression, et sa densité est en raison directe de cette pression ou de sa force élastique. Cette expérience a été faite pour la première fois par Mariote, et la loi que nous venons d'énoncer a conservé le nom de ce physicien.

On peut facilement faire cette expérience sur un gaz quelconque ; il suffit pour cela d'adapter à l'extrémité D de la branche D C un robinet que l'on puisse mettre en communication avec un ballon plein du gaz sur lequel en veut opérer lorsque le tube est exactement plein de mercure ; alors, en inclinant tout l'appareil, le mercure descend, et une portion du gaz passe dans le tube D C ; on peut ensuite fermer le robinet et le comprimer en chargeant le tube A B. On a trouvé ainsi que tous les gaz étaient soumis à la loi que nous avons énoncée ; mais nous devons avertir que l'expérience ne réussit qu'autant que les gaz sont parfaitement secs, car s'ils renfermaient de la vapeur d'eau, la pression en condenserait une partie, et il y aurait une diminution de volume plus grande. Pour introduire les gaz parfaitement secs, il suffit de les faire passer à travers un tube de verre renfermant une substance ayant une très-grande affinité pour l'eau, par exemple, du chlorure de chaux.

E. *Détermination de la Densité des Gaz.*

287. Pour estimer la densité des gaz, on est convenu de les rapporter à celle de l'air atmosphérique sous la pression de 0,^{m}76, et à la température de la glace fondante ; on a pris un gaz pour terme de comparaison, afin que les densités ne soient pas exprimées par des fractions trop petites ; on a choisi l'air atmosphérique, parce que ce gaz est de même nature sur toute la surface de la terre et dans toutes les saisons ; enfin, on est convenu de prendre une pression et une température constantes, parce que la densité des gaz varie avec ces deux élémens.

288. Si la température était celle de la glace fondante, et la pression barométrique de 0,^{m}76, la détermination de la densité d'un gaz serait

une opération très-simple ; en effet, on commencerait par prendre un ballon (*fig.* 149), on enlèverait l'air qui y est renfermé au moyen d'une machine que nous décrirons bientôt, et on le ferait rentrer à travers un tube de verre plein de chlorure de chaux, afin de le dessécher ; on le pèserait exactement à une balance très-sensible, après quoi on ferait le vide de nouveau, et son poids, retranché de celui obtenu d'abord, donnerait celui de l'air sec qu'il renfermait ; ensuite on y ferait passer le gaz dont on veut déterminer la densité, toujours à travers un tube de verre renfermant une substance très-déliquescente, et son poids, retranché de celui du ballon vide, serait celui du gaz renfermé dans le ballon : il ne resterait plus alors, pour obtenir la densité cherchée, qu'à diviser le poids du gaz par celui de l'air. Cette méthode est parfaitement analogue à celle que l'on emploie pour les liquides ; mais il y a une cause d'erreur dont il faut être prévenu : il faut avoir soin de ne jamais fermer le ballon, lorsqu'on a introduit l'air ou le gaz, avant de s'être assuré qu'ils ont une force élastique égale à celle de l'air atmosphérique ; il suffit pour cela, lorsque c'est l'air, de laisser le robinet ouvert pendant quelque secondes, et lorsque c'est le gaz, il faut, si l'on remplit le ballon au moyen d'une cloche à robinet (*fig.* 153), ne fermer le robinet du ballon qu'après avoir enfoncé la cloche dans la cuve, jusqu'à ce que le niveau du métal intérieur soit sur le prolongement du niveau extérieur.

Nous venons de supposer que la température était celle de la glace fondante, et qu'elle restait constante ; si elle était quelconque, mais toujours la même, il n'y aurait aucune correction à faire à la densité obtenue par le moyen que nous venons d'indiquer ; car nous verrons plus tard que tous les gaz, pour le même nombre de degrés de chaleur, se dilatent d'une même fraction de leur volume à la température de zéro ; par conséquent, les gaz à la même température ont toujours le même rapport de densité ; ainsi, pourvu que les trois pesées du ballon se fassent à la même température des gaz intérieurs et de l'air environnant, le résultat sera le même, quelle que soit d'ailleurs cette température ; mais si l'on voulait obtenir le poids absolu de l'un d'eux, on ne l'aurait qu'à la température de l'opération, et pour en déduire le poids à toute autre température, il faudrait

connaître la loi de dilatation des gaz. Il est évident que si la température variait sensiblement d'une pesée à une autre, il faudrait ramener le poids de chaque gaz à la même température, avant de les diviser pour obtenir la pesanteur spécifique cherchée ; mais il y aurait encore une autre correction à faire, attendu que le verre dont le ballon est composé étant aussi susceptible de se dilater et de se contracter par les variations de températures, le volume du ballon ne serait pas exactement le même ; par conséquent, il faudrait encore tenir compte de cette variation. Nous ne nous occuperons de ces corrections que dans la 2[me] Partie de ce Cours.

Enfin, nous avons supposé que la pression était exactement de $0^m,76$ pendant toute la durée de l'opération ; si elle était différente, mais constante, la densité obtenue serait encore exactement la même que si la pression eût été de 0,76 ; car les gaz se dilatant et se contractant de la même manière, il est évident que sous des pressions égales, quelles qu'elles soient d'ailleurs, ils ont le même rapport de densité ; mais si on voulait obtenir le poids absolu d'un gaz, on ne l'obtiendrait que sous la pression à laquelle il aurait été soumis pendant la durée de l'opération, et pour en déduire le poids sous une pression quelconque, on y parviendrait facilement au moyen de la loi de Mariote : par exemple, si la pression étant de 0,70, le poids du gaz était de 4^g, pour obtenir ce poids sous la pression de 0,76, il faudrait faire la proportion, $0,70 : 0,76 :: 4 : x$, d'où $x = 4^g,34$. Il est évident que si la pression variait durant l'opération, il faudrait réduire les poids des gaz à la même pression, avant de diviser ces poids pour obtenir la densité cherchée. Il y aurait aussi une correction à faire relativement à la perte de poids du ballon dans l'air, si la pression extérieure n'était pas la même pendant toute la durée de l'opération.

En résumant ce qui précède, on obtient exactement la densité d'un gaz, lorsque les trois pesées se font à la même température et sous la même pression intérieure et extérieure ; lorsque la pression seule varie, il est très-facile de faire les corrections ; mais si la température n'est point constante, les variations de cet élément exigent des corrections dont nous ne parlerons que plus tard.

Nous terminerons cet article par le Tableau des Poids et des Densités des principaux Gaz connus.

SUBSTANCES.	DENSITÉS.	POIDS d'un litre de gaz sous la pression de 0,76, et à la température de la glace fondante.
Air atmosphérique.	1,	1g,299075.
Gaz oxigène.	1,10359.	1g,433530.
Gaz azote.	1,96913.	1g,258972.
Gaz hydrogène	0,07321.	0g,095105.
Gaz acide carbonique	1,51961.	1g,974088.
Gaz acide hydro-chlorique.. .	1,24740.	1g,619943.
Gaz ammoniaque	0,59669.	0g,775145.

§ II.

Des Corps Flottans dans les Gaz.

289. Nous ne parlerons que des corps qui flottent dans l'atmosphère, parce que les propriétés physiques de l'air appartenant aussi à tous les gaz, ce que nous dirons des corps flottans dans l'air sera également applicable aux corps flottans dans un autre gaz quelconque.

290. *Conditions d'Équilibre.* Lorsqu'un corps est en totalité plongé dans l'atmosphère, il tend à tomber avec une force égale à son poids, et à monter avec une force égale à celui du fluide déplacé (58). Il résulte de là que quand un corps est en équilibre dans l'atmosphère, il faut que son poids soit égal à celui de l'air déplacé ; car si son poids était plus grand, il tomberait, et s'il était plus petit, il tendrait à s'élever.

Si un corps est en équilibre dans l'atmosphère, cet équilibre est stable relativement à sa distance de la terre ; car si ce corps s'élève, il passera dans des couches d'air moins denses, le poids du fluide déplacé deviendra plus petit, et comme son poids diminue beaucoup moins rapidement, il sera ramené par la différence de ces forces à sa position initiale ; de même s'il se rapproche de la terre, il viendra déplacer de l'air plus dense,

sa force ascensionnelle l'emportera sur son poids, et il sera encore ramené à sa position initiale. Quant à la stabilité de l'équilibre, par rapport à sa position relativement à la verticale ; s'il est homogène ; son centre de gravité coïncide avec celui du fluide déplacé, par conséquent, les deux forces qui tendent à faire monter et descendre le corps, étant appliquées au même point, se détruiront toujours, quelle que soit la position du corps ; le corps sera donc en équilibre dans toutes les positions possibles : mais si le corps n'est pas homogène, l'équilibre ne pourra être stable qu'autant que son centre de gravité sera au-dessous de celui du fluide. En effet, soit (*fig.* 166) G le centre de gravité du corps, O celui du fluide déplacé ; si on incline le corps, le point G s'élèvera, et le point O descendra ; or, comme la force qui est appliquée au point G tend à le faire descendre, et celle qui est appliquée au point O tend à le faire monter, il s'ensuit que le corps sera ramené à sa position initiale ; mais si le point G était au-dessus du point O (*fig.* 167), il est évident que les forces appliquées à ces points tendraient encore à incliner le corps davantage.

291. *Ballons.* Les ballons sont des corps qui s'élèvent dans l'air par leur légèreté spécifique ; les premiers ballons qui furent construits par Montgolfier, en 1782, étaient formés d'une enveloppe de papier, remplis d'air dilaté par la chaleur. Mais bientôt M. Charles imagina de substituer le gaz hydrogène à l'air dilaté par la chaleur, et une enveloppe de taffetas, enduite d'un vernis élastique, à ces enveloppes de papier. Il en résulta plusieurs avantages importans : le premier était d'avoir une force ascensionnelle beaucoup plus considérable, et qui, pour être permanente, n'avait pas besoin d'être sans cesse entretenue par un foyer de chaleur ; le second, d'avoir une enveloppe capable de résister à la dilatation du gaz intérieur, et que l'humidité ne pouvait altérer. La force ascensionnelle est beaucoup plus considérable, car pour 100 degrés de chaleur l'air ne perd, par sa dilatation, à peu près que $\frac{1}{4}$ de son poids, tandis que le gaz hydrogène a une densité environ 13 fois plus petite que celle de l'air.

Les aérostats dont on se sert pour s'élever dans l'atmosphère ont une forme à peu près sphérique, l'enveloppe est formée de fuseaux cousus

et recouverts d'un vernis formé de gomme élastique et d'essence de térébenthine, ou d'huile de lin lithargirée ; à la partie supérieure se trouve une soupape retenue par un ressort, et qui peut s'ouvrir par une corde qui traverse le ballon et qui pend à la partie inférieure. L'hémisphère supérieur est recouvert par un filet dont les fils, réunis par groupes au delà de l'équateur, descendent et soutiennent une nacelle en osier. On gonfle le ballon en le mettant, par sa partie inférieure, en communication avec des tonneaux renfermant du fer ou du zinc, de l'eau et de l'acide sulfurique. Le ballon ne doit jamais être exactement fermé, car la force expansive du gaz, lorsqu'il pénètre dans les hautes régions de l'atmosphère, le briserait infailliblement ; on le laisse ouvert par la partie inférieure, et on ne le gonfle jamais entièrement ; la dilatation du gaz, à mesure qu'il s'élève, le remplit bientôt complétement. Lorsque l'on veut augmenter la force ascensionnelle, on jette du lest, et lorsque l'on veut descendre, on ouvre la soupape ; le gaz s'échappe, le ballon diminue de volume et tombe lentement. La nacelle est garnie d'une ancre attachée à une corde.

Le voyage aérostatique le plus important a été fait par M. Gay-Lussac. Ce célebre physicien, parti du Conservatoire des Arts et Métiers de Paris le 29 fructidor an 12, s'éleva à une hauteur de 7000 mètres au-dessus du niveau de la mer, hauteur à laquelle l'homme n'était jamais parvenu. Le baromètre qui, au lieu du départ, était à 76,52, descendit à 32,88 à la limite de l'ascension, et le thermomètre, qui était à 27° 75, descendit irrégulièrement jusqu'à 9 degrés au-dessous du terme de la congélation. C'est dans ce voyage que M. Gay-Lussac recueillit de l'air des hautes régions de l'atmosphère, dont l'analyse constata ensuite l'identité de composition chimique avec celui qui baigne la surface de la terre (1).

---

(1) La construction d'un ballon est une opération très-simple, sur laquelle cependant nous pensons qu'il ne sera pas inutile de donner quelques détails. La première chose à faire, c'est de déterminer son volume : supposons, par exemple, qu'il doive soulever un poids P, et que p soit le poids de l'unité de surface de l'enveloppe, en représentant par d le poids de l'unité de volume de l'air, et par d' celui de l'hydrogène, la force verticale du ballon de haut en bas est évidemment égale au poids de l'enveloppe, à celui du gaz hydrogène, et enfin, au poids de la nacelle ; par conséquent, si on suppose le ballon sphérique et d'un rayon R, ce poids total sera $4\pi R^2 p + \frac{4}{3}\pi R^3 d' + P$, et la

292. Indépendamment des corps qui flottent dans l'atmosphère par leur légèreté spécifique, il en est qui restent suspendus par leur grande division et par le mouvement continuel de l'air. Les corps exigent, pour rester suspendus dans l'air, des courans d'autant plus forts qu'ils sont plus volumineux et plus denses ; aussi dans l'air calme des appartemens fermés, les corps qui restent suspendus sont d'une ténuité extrême, et ne peuvent être visibles que lorqu'on les éclaire fortement par les rayons solaires qu'on laisse pénétrer à travers un trou pratiqué à un volet.

Les nuages paraissent être dans le même cas que les corps dont nous venons de parler ; car, dans les nuages l'eau n'est point réellement en vapeurs ; elle est en partie condensée, et, d'après les observations de Saussure, elle est réunie en petites sphères creuses, pleines d'air ; mais l'eau dans cet état, qu'on désigne sons le nom de Vapeurs Vessiculaires, a une densité plus grande que celle de l'air ; cependant la durée du séjour des nuages dans l'atmosphère, même par les temps très-calmes, leur chute, lorsque le baromètre descend, et leur ascension qui suit toujours celle du baromètre, semblent démontrer qu'ils sont soutenus par une force que l'on ne connaît point encore, mais qui produit le même effet que s'ils avaient réellement une densité plus petite que celle de l'air.

---

force ascensionnelle sera $\frac{4}{3}\pi R^3 d$; par conséquent, on aura $\frac{4}{3}\pi R^3 d' + 4\pi R^2 p + P = \frac{4}{3}\pi R^3 d$ équation, d'où l'on pourra facilement tirer la valeur de R, lorsque l'on aura substitué pour π, P, p, d et d', leurs valeurs numériques. Lorsque le rayon est déterminé, il est facile de construire les fuseaux lorsqu'on en connaît le nombre ; en effet, pour en tracer le patron, il suffit de tirer une ligne A B (*fig.* 168) égale à la demi-circonférence du ballon, de mener la ligne milieu $a\,b$, et les lignes intermédiaires $c\,d$, $c'\,d'$, $e\,f$, $e'\,f'$, $g\,h$, $g'\,h'$ qui partagent le demi-fuseau en quatre parties égales. Pour trouver la largeur du fuseau sur ces différentes lignes, il faut remarquer que quand le fuseau est placé sur la surface de la sphère, chacune de ces lignes est la même portion du parallèle correspondant : ainsi, par exemple, si les fuseaux sont au nombre de 12, chacune des lignes $a\,b$, $c\,d$, $e\,f$, est $\frac{1}{12}$ de la circonférence du cercle correspondant ; il ne s'agit donc plus que de trouver les rayons de ces cercles ; on peut le faire en traçant (*fig.* 169) un cercle dont le rayon soit égal à celui du ballon, divisant le quart de la circonférence en quatre parties égales, et menant parallèlement au diamètre les lignes $n\,n'$, $p\,p'$, $q\,q'$ qui seront les rayons cherchés ; mais il sera plus exact de les calculer, car ces rayons sont les cosinus des arcs de 0°, 22°,30', 45°, et 67°,30' ; on pourra alors calculer leurs circonférences, en prendre la 12me partie que l'on portera sur les lignes perpendiculaires à A B (*fig.* 168) ; on joindra ensuite les points *A g e c a c' e' g' B* par une ligne courbe, et on aura un patron du fuseau d'autant plus exact que leur nombre sera plus considérable, ainsi que celui des points qu'on aura déterminé.

§ III.

Mouvemens des Corps Gazeux.

293. Les corps gazeux peuvent être mis en mouvement par plusieurs causes : 1° par l'action de la chaleur qui agissant inégalement sur les différentes parties qui les composent, produit des dilatations, et par suite des courans dans différentes directions ; 2° en faisant mouvoir dans les gaz des corps qui leur transmettent une partie de leur mouvement ; 3° enfin, les gaz renfermés dans des vases clos peuvent être mis en mouvement lorsqu'ils sont comprimés et qu'on les laisse échapper dans le vide ou dans un milieu d'une moindre élasticité.

294. *Mouvemens produits par la Chaleur.* Les courans d'air qui existent à la surface du globe et que l'on nomme *Vents*, paraissent provenir de l'échauffement et du refroidissement partiel de l'atmosphère : si la surface de la terre était régulière et homogène, il y aurait des courans permanens, dont les périodes coïncideraient avec celles des mouvemens du soleil ; mais la distribution irrégulière des continens, les chaînes de montagnes, les forêts, les bassins, les courans d'eau qui les traversent, rompent les courans d'air, les détournent, les réfléchissent, et compliquent tellement leur marche que jusqu'ici il a été impossible d'en saisir la loi. Cependant, il en est un qui est permanent, régulier, et dont la cause est facile à comprendre ; nous voulons parler du courant qui règne sous l'équateur de l'orient à l'occident, et qu'on désigne sous le nom de *Vents Alizés*.

295. Les couches d'air qui sont en contact avec la terre sous l'équateur étant plus échauffées par l'action du soleil que celles qui sont placées sous les autres parallèles, parce que les rayons solaires y sont moins inclinés, et les couches d'air qui sont en contact avec la terre étant aussi plus échauffées que celles qui sont à la partie supérieure, parce que ces couches sont plus denses, et qu'elles touchent la terre qui s'échauffe bien plus facilement, il en résulte que sous l'équateur il y a un courant ascen-

dant continuel d'air chaud ; mais en même temps l'air situé sous les autres parallèles se porte vers l'équateur dans la direction des méridiens ; ces courans arrivent à l'équateur avec la vitesse de rotation qu'ils avaient sous les parallèles qu'ils viennent de quitter ; cette vitesse étant plus petite que celle de l'équateur, il en résulte que les corps qui sont à l'équateur sont frappés par ces couches d'air en sens contraire du mouvement réel de la terre, c'est-à-dire d'orient en occident.

C'est la dilatation de l'air occasionnée par la chaleur qui produit le tirage des cheminées, le renouvellement de l'air de nos appartemens et les courans ascendans continuels à la surface de la terre qui mêlent les différentes couches de l'atmosphère, et établissent dans toutes ses parties une parfaite identité de composition chimique.

296. *Mouvemens communiqués.* Lorsqu'un corps est en mouvement dans l'atmosphère, il communique une partie de son mouvement à l'air qu'il rencontre ; de là des courans artificiels qui s'étendent à une masse d'air d'autant plus grande que la force motrice est elle-même plus considérable. Les machines qui sont destinées à mettre l'air en mouvement par communication, portent le nom de Ventilateur ; les plus simples sont les éventails ; presque toutes les autres, dont les formes sont plus ou moins compliquées, sont destinées à séparer de certains corps solides la poussière qu'ils renferment, et que les courans d'airs entraînent facilement.

Lorsque les impulsions communiquées à l'air se succèdent avec une grande rapidité, comme celles qui proviennent des vibrations d'un corps élastique, la couche d'air immédiatement frappée se condense et se dilate successivement ; ce dernier effet comprime la couche suivante, qui se dilate à son tour en comprimant celle qui la suit : ces alternatives de condensations et de dilatations se propagent dans tous les sens, et lorsqu'elles sont régulières et suffisamment rapides, elles produisent sur l'organe de l'ouïe, qu'elles viennent frapper, la sensation du son. Nous reviendrons sur ces phénomènes à la fin de ce chapitre.

297. *Écoulement des Gaz comprimés.* Lorsqu'un gaz est renfermé dans un vase clos, et qu'il s'échappe par une ouverture quelconque, la quantité de gaz écoulé dans le même temps, toutes les autres circonstances étant

égales d'ailleurs, dépend : 1° de la nature du gaz ; 2° des dimensions de l'ouverture ; 3° et de la longueur du tuyau, lorsque l'écoulement n'a pas lieu par une mince paroi.

Il résulte des observations faites par MM. Girard et Cagniard de Latour, sur l'écoulement de l'air atmosphérique et du gaz hydrogène carboné, 1° que, dans les mêmes circonstances, la dépense en volume est plus grande pour le gaz hydrogène carboné que pour l'air atmosphérique, mais dans un rapport plus petit que le rapport inverse de leur densité ; (il paraît même, d'après les observations de M. Faraday, qu'en général la dépense est d'autant plus grande que la densité du gaz est plus petite ; cependant, cette loi n'a point été reconnue pour de faibles pressions) ; 2° que ces deux gaz se meuvent suivant les mêmes lois, et, par conséquent, qu'il est très-probable qu'il en serait de même de tous les autres, 3° que la résistance pour un même gaz est d'autant plus grande que le tuyau de conduite est plus long et plus étroit ; 4° que cette résistance dans un même tuyau est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne ; 5° que la dépense dans un tuyau donné d'une grosseur uniforme, est en raison directe de la pression, et en raison inverse de la racine carrée de la longueur du canal.

Nous avons déjà vu (page 168) que l'écoulement d'un gaz produit une force qui tend à faire mouvoir le vase en sens contraire ; c'est à cette force que sont dus le recul des armes à feu et le mouvement des artifices ; en effet, lorsque l'on enflamme la poudre renfermée dans la culasse d'un canon, il se développe instantanément un très-grand volume de gaz ; ce gaz presse avec une égale force toutes les parois de l'espace dans lequel il se forme ; la paroi la moins résistante, qui est toujours celle formée par le projectile, cède ; mais en même temps le canon est poussé en sens contraire avec une force aussi considérable ; mais la vitesse du recul est plus petite dans le rapport des masses du canon et du projectile, et de plus, elle est anéantie en très-peu de temps par les frottemens. L'ascension des fusées a lieu en sens contraire de l'écoulement des gaz qui se forment par la combustion de la poudre ; c'est en fixant les artifices autour d'un axe mobile sur lui-même et disposant les fusées obliquement

aux rayons, que l'on produit les mouvemens de rotation des soleils ; c'est en plaçant à la suite les unes des autres plusieurs fusées qui brûlent successivement, qu'on parvient à former ces artifices dont les mouvemens changent brusquement de direction et de vitesse.

298. *Résistance de l'air.* Lorsque l'air est en mouvement, il produit, contre les corps qui sont en repos, un certain choc qui paraît être égal à la résistance que ces corps éprouveraient en se mouvant en sens contraire dans le fluide en repos. D'après le simple raisonnement, la résistance d'un gaz est proportionnelle à sa densité et au carré de la vitesse ; car la résistance est proportionnelle à la masse d'air choquée et à la vitesse ; or, la masse d'air déplacée est dans le rapport de sa densité et de la vitesse du corps ; l'observation a confirmé ce résultat. Mais la résistance ne croît pas comme l'étendue de la surface résistante, elle croît dans un plus grand rapport, et relativement à la forme et à l'inclinaison de la surface choquée ; l'expérience n'a confirmé aucuns des résultats du calcul ; on sait seulement qu'une surface plane éprouve d'autant moins de résistance qu'elle se présente sous une plus grande inclinaison, et qu'une surface courbe éprouve moins de résistance lorsqu'elle présente sa convexité que lorsqu'elle présente sa concavité.

299. Lorsqu'un corps se meut dans un milieu homogène, la résistance qu'il éprouve diminue continuellement sa vitesse ; si le corps n'est animé que par une force constante, sa vitesse finit par s'anéantir ; mais si le corps est sollicité par une force accélératrice, la résistance croissant comme le carré de la vitesse, cette dernière finit par devenir uniforme. La résistance de l'air a, par conséquent, une très-grande influence sur la trajectoire décrite par les projectiles ; elle en change complétement la nature et diminue beaucoup la portée.

300. La résistance de l'air est souvent employée pour modérer le mouvement des machines. Les appareils qu'on désigne sous le nom de Volans, qui sont formés d'une roue à ailes planes dirigées dans le sens de l'axe et dont la sonnerie des pendules et beaucoup d'autres machines sont garnies, ont pour objet de ralentir les mouvemens auxquels ils sont liés par la résistance croissante que l'air oppose à leur rotation, à mesure qu'elle devient plus accélérée.

301. *Mouvemens des Gaz dans les Liquides.* Lorsqu'un gaz se dégage au fond d'un liquide, il se divise en bulles plus ou moins volumineuses, qui s'élèvent verticalement à travers le liquide; les bulles dans leur mouvement ascendant s'aplatissent horizontalement, parce que c'est dans le sens du mouvement que s'exerce la plus grande pression du liquide, et elles s'élèvent avec un mouvement accéléré, parce que c'est la différence de poids du liquide déplacé et du gaz qui produit le mouvement, et que ces forces sont au nombre de celles dont les actions sont permanentes; mais si la hauteur du liquide était assez considérable, comme la résistance croît proportionnellement au carré de la vitesse, il arriverait nécessairement une époque à laquelle la vitesse deviendrait uniforme.

§ IV.

Machines et Appareils dont le jeu est fondé sur les propriétés de l'Air.

302. Nous examinerons d'abord les machines qui ont pour objet de dilater ou de condenser l'air, et leurs différentes applications; ensuite nous exposerons les appareils dont le jeu est dû à la pression de l'air.

A. *Machines à dilater et à condenser l'Air, et leurs applications.*

303. *Machine à dilater l'Air.* Soit A (*fig.* 170) un ballon rempli d'air, surmonté d'un cylindre dans lequel se meut un piston; la partie inférieure du corps de pompe et le piston sont percés de deux ouvertures garnies de deux soupapes *m* et *n*, se fermant par une pression de haut en bas; lorsqu'on élève le piston, l'air qui était au-dessous se dilate, et perd une portion de sa force élastique; alors l'air atmosphérique, par son excès de pression, ferme la soupape *n*, tandis que l'air renfermé dans le réservoir A ouvre la soupape *m*, et s'introduit en partie dans le corps de pompe; lorsqu'on abaisse le piston, le gaz du corps de pompe comprimé augmente de force élastique, ferme la soupape *m* et ouvre la soupape *n* par laquelle il se dégage. Ainsi, à chaque ascension du piston une portion de l'air du réservoir passe dans le corps

de pompe, et à chaque abaissement cet air est rejeté dans l'atmosphère ; par conséquent, en continuant le jeu du piston, on dilatera continuellement l'air du réservoir. Pour calculer l'effet de cette machine, il faut connaître le rapport des capacités du réservoir et du corps de pompe : supposons, par exemple, que ces capacités soient égales : à la première ascension du piston, l'air du réservoir s'étendra dans un espace deux fois plus grand ; par conséquent, il restera dans le ballon un même volume d'air dont la densité, la force élastique et la masse seront deux fois plus petites ; après la seconde ascension, la masse restante sera le quart de ce qu'elle était d'abord ; après la troisième, le $\frac{1}{8}$, etc. Si le corps de pompe avait une capacité égale seulement à la moitié de celle du réservoir, à chaque élévation du piston l'air du réservoir s'étendrait dans un espace moitié plus grand ; par conséquent, à chaque mouvement du piston l'air du ballon diminuera de $\frac{1}{3}$ en masse, en densité et en force élastique. Il est facile de voir, par les mêmes raisonnemens, que si le volume du corps de pompe était $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, etc. de celui du réservoir, à chaque coup de piston l'air du réservoir diminuerait de $\frac{1}{4}$, ou de $\frac{1}{5}$, ou de $\frac{1}{6}$, etc. Il suit de là, qu'après un nombre de coups de pistons d'autant plus grands que la capacité du cylindre est plus petite relativement à celle du réservoir, on pourra toujours parvenir à ne laisser dans le réservoir qu'une quantité d'air aussi petite qu'on voudra : mais quelque prolongée qu'on suppose l'action du piston, on ne pourra jamais faire un vide parfait. Dans la pratique on rencontre plusieurs causes qui concourent à empêcher d'atteindre même les limites que donne le calcul ; ces causes sont : 1° les vapeurs aqueuses qui s'exhalent des parois du vase et du corps de pompe ; 2° l'inertie des soupapes qui ne peuvent se soulever que quand l'air du ballon a conservé une certaine tension ; 3° enfin, la pression de l'air extérieur qui tend à s'introduire avec une force d'autant plus grande que l'air intérieur est plus dilaté, et qui finit toujours, même dans les machines les plus parfaites, au bout d'un temps plus ou moins considérable, par s'introduire entre le corps de pompe et le piston.

304. *Machine Pneumatique.* La machine pneumatique est un appareil

absolument semblable à celui que nous venons de décrire, mais dont le corps de pompe et le réservoir sont disposés d'une manière plus commode. Dans les machines ordinaires dont les figures 171 et 172 représentent deux projections, il y a deux corps de pompe; les pistons sont garnis de deux crémaillères qui s'engagent dans une roue dentée, cette dernière est mise en mouvement par un levier A B; les soupapes d'aspiration sont formées par des cônes garnis de cuir, qui s'engagent dans des cavités de même forme; ces soupapes sont fixées à des tiges qui passent à frottement durs à travers les pistons; les pistons en s'élevant entraînent les soupapes jusqu'à une petite hauteur, et les ferment en s'abaissant. Quant aux soupapes des pistons, elles sont également coniques et retenues par un ressort en spirale; les deux corps de pompes communiquent par un même canal avec un orifice *o* percé au centre d'un plateau de verre dépoli; c'est sur ce plateau que l'on pose les cloches qui servent de réservoir; leurs bords bien dressés s'appliquent exactement sur le plateau; c'est sur la vis à travers laquelle passe le canal de communication avec les corps de pompe, que l'on adapte les ballons à robinets d'où l'on veut enlever l'air; le canal intérieur communique avec une cloche de verre P Q renfermant un baromètre; enfin, 2 robinets R, S, et sont destinés, le premier, à laisser rentrer l'air dans l'appareil et à intercepter ou à établir la communication entre le réservoir et les corps de pompe (la figure R présente sa perspective), et le second, à faire communiquer la cloche fixe P Q avec le grand réservoir.

Les soupapes d'aspiration sont coniques, afin qu'elles ferment plus exactement; elles sont soulevées par les pistons, afin que la communication avec le réservoir et les corps de pompe puissent s'établir, quelle que soit la force élastique de l'air renfermé dans le premier: le robinet R remplit deux fonctions différentes; la dernière est nécessaire pour conserver le vide, car c'est principalement par les corps de pompe que l'appareil peut perdre: la cloche P renferme un tube *a b c* fermé en *a*, ouvert en *b*, et plein de mercure, qui sert à mesurer la force élastique de l'air renfermé dans le réservoir. Quelquefois ce tube est un baromètre complet; on peut alors mesurer à chaque instant la dilatation: mais comme cette mesure n'est importante que lorsque la dilatation est très-grande, il n'est pas nécessaire d'avoir

un tube si grand ; il suffit que la différence de niveau puisse être de quelques centimètres : tant que la force élastique du gaz est plus considérable que celle que ce tube peut indiquer, le métal exerce au point *a* une certaine pression, qui va en diminuant à mesure que la dilatation augmente ; lorsque la différence de niveau du mercure dans le tube est égale à celle qui aurait lieu dans un baromètre complet, cette pression devient nulle ; au delà, le mercure descend au-dessous du point *a*, et les indications de ce baromètre tronqué sont parfaitement égales à celles d'un baromètre entier. Dans les meilleures machines connues, on ne peut jamais faire un vide au-dessous de un ou deux millimètres ; mais il est suffisant pour toutes les expériences physiques, même les plus délicates.

305. On peut facilement, au moyen de la machine pneumatique, constater les différentes propriétés que nous avons reconnues dans l'air atmosphérique.

Lorsque l'on a fait le vide sous une cloche posée sur le plateau, on remarque qu'elle y adhère avec une très-grande force. Cette force est évidemment la pression de l'air qui agit sur la surface extérieure de la cloche, pression qui n'est plus détruite par la force élastique de l'air intérieur. On rend cet effet encore plus évident au moyen de deux hémisphères en cuivre (*fig.* 173) qui emboîtent exactement l'un dans l'autre, et dont l'un renferme un ajutage à robinet que l'on peut visser sur le plateau de la machine pneumatique : lorsque le vide est fait, on ferme le robinet et on enlève l'appareil ; on ne peut alors les séparer qu'en employant une très-grande force ; car la pression exercée sur un des hémisphères est égale au poids d'un cylindre de mercure qui aurait pour base la surface du cercle de jonction, et pour hauteur $0^m,76$, en supposant que le vide soit parfait ; mais aussitôt qu'en ouvrant le robinet on a permis à l'air de rentrer, les deux hémisphères se séparent avec la plus grande facilité ; on emploie aussi pour prouver la pression de l'air, un cylindre de verre (*fig.* 174), ouvert par le bas et fermé supérieurement par une vessie de cochon fortement assujettie par une ficelle ; on place ce cylindre sur le plateau de la machine pneumatique ; à mesure que l'air se dilate, la membrane qui ferme le cylindre cède sous la pression

de l'air extérieur, dont l'effet va toujours en croissant ; elle se courbe, et bientôt sa résistance n'étant pas suffisante, elle se brise avec fracas.

Si l'on place sur le plateau de la machine une cloche (*fig.* 175), à travers la tubulure de laquelle passe la tige d'un baromètre, à mesure que la dilatation augmente, le mercure descend. Si dans une cloche (*fig.* 176) on place une vessie fermée et dégonflée, à mesure que l'on dilate l'air qui l'environne, elle augmente de volume : ces effets sont trop évidens pour que nous insistions sur leur explication. Lorsqu'on place sous un récipient un vase (*fig.* 177) renfermant de l'air et de l'eau, et dont l'orifice est garni d'un tube ouvert par les deux bouts, effilé par le haut, et qui se prolonge jusqu'au fond du vase, à mesure que l'on dilate l'air du récipient, l'eau pressée par l'air du flacon s'élève dans le tube et jaillit à une hauteur plus ou moins considérable.

306. *Machine à comprimer l'Air.* Soit A (*fig.* 178) un ballon surmonté d'un cylindre dans lequel se meut un piston ; supposons que la partie inférieure du cylindre ainsi que le piston soient percés chacun d'une ouverture garnie d'une soupape, s'ouvrant par une pression de haut en bas ; lorsqu'on élèvera le piston, la soupape *m* se fermera par la force élastique de l'air renfermé dans le ballon, et la soupape *n* s'ouvrira par la pression de l'atmosphère ; le cylindre se remplira donc d'air à la pression extérieure : lorsqu'on fera descendre le piston, l'air du cylindre se condensera ; la soupape d'aspiration *n* se fermera, tandis que la soupape *m* s'ouvrira, l'air du corps de pompe pénétrera donc dans le ballon : il est évident qu'à chaque coup de piston on introduira dans le ballon le même volume d'air, et, par conséquent, que si la résistance du ballon est suffisante, on pourra augmenter indéfiniment la densité, et la force élastique de l'air du réservoir. Si la capacité du corps de pompe était égale à celle du réservoir, la quantité d'air accumulée à chaque coup de piston formerait la progression des nombres naturels 1, 2, 3, 4, 5, etc. Ainsi, après trente coups de pistons la densité serait trente fois plus grande qu'elle ne l'était d'abord. Si la capacité du corps de pompe était seulement $\frac{1}{2}$ de celle du réservoir, la densité serait successivement 1 $\frac{3}{2}$ $\frac{4}{2}$ $\frac{5}{2}$ $\frac{6}{2}$ $\frac{7}{2}$, etc.; il sera facile, d'après cela, de calculer la densité

du gaz accumulé après un nombre donné de coups de piston, lorsqu'on connaîtra le rapport des capacités du corps de pompe et du réservoir.

307. On emploie quelquefois dans les recherches physiques un appareil qu'on nomme Machine de Compression (*fig.* 179), et qui a pour objet d'accumuler l'air dans un récipient A. Cette machine est absolument semblable à la machine pneumatique, seulement les soupapes sont toutes retenues par des ressorts en spirales et se meuvent en sens contraire; le récipient est fortement assujetti sur le plateau, et l'éprouvette renferme un tube très-long, ouvert par les deux bouts, plongé par sa partie inférieure dans une cuvette pleine de mercure; lorsque la force élastique de l'air accumulé dans le réservoir est deux fois plus grande que celle de l'atmosphère, le mercure s'élève à $0^m,76$; lorsqu'elle est triple, il s'élève à deux fois cette hauteur, et ainsi de suite.

Ce tube devant avoir une très-grande hauteur pour indiquer les pressions de plusieurs atmosphères, il serait plus commode de se servir d'un tube de baromètre, fermé à son extrémité supérieure, et plein d'air; on diviserait l'échelle en millimètres, et il serait très-facile de calculer les pressions correspondantes aux différentes élévations du mercure dans le tube; en effet, lorsque le niveau du mercure dans le tube est sur le prolongement du niveau extérieur, la force élastique de la colonne d'air dans le tube est égale à celle de l'air qui pèse sur la cuvette; mais si le mercure s'élève dans le tube à une hauteur b, la force élastique de l'air du réservoir est égale au poids de la colonne liquide soulevé, plus, à la force élastique de l'air comprimé dans le tube. Or, la force élastique de l'air renfermé dans le tube, en désignant par a sa longueur, est, d'après la loi de Mariote, égale à $0^m,76 \times \frac{a}{a-b}$; par conséquent, la force élastique de l'air comprimé dans le réservoir est égal à $b + 0^m,76 \frac{a}{a-b}$; la longueur du tube étant connue, on pourra, en mettant pour b successivement 1, 2, 3, etc. millimètres, trouver les pressions réelles correspondantes aux divisions de l'échelle.

308. *Pompes.* On distingue ordinairement trois espèces de pompes, les pompes foulantes (*fig.* 180), les pompes aspirantes (*fig.* 181), et enfin les pompes foulantes et aspirantes (*fig.* 182).

Les pompes sont essentiellement composées d'un tuyau vertical qui plonge dans l'eau, d'un piston M qui se meut dans une partie du cylindre, et de deux soupapes m, m'; l'une d'elles est fixée à la partie inférieure du cylindre et au-dessous de l'eau dans les pompes foulantes, au-dessus du

niveau dans les autres ; la seconde soupape est placée sur le piston lui-même, dans les pompes foulantes (*fig.* 180) et les pompes aspirantes (*fig.* 181), et a un tuyau latéral qu'on désigne sous le nom de *Tuyau d'Ascension*, dans les pompes foulantes et aspirantes (*fig.* 182).

Dans les pompes foulantes (*fig.* 180) en soulevant le piston M, la soupape *m'* reste ouverte, et le corps de pompe est toujours rempli d'eau ; lorsqu'on l'abaisse, la soupape *m'* se ferme par la pression que le piston communique à l'eau qui est au-dessous de lui ; cette même pression, qui se transmet dans tous les sens à travers la masse d'eau contenue dans le corps de pompe et dans le tuyau latéral, ouvre la soupape *m*, et le liquide du corps de pompe passe dans le tuyau d'ascension. Lorsqu'on relève le piston M, la soupape *m* se ferme par le poids de l'eau élevée, et la soupape *m'* s'ouvre par son propre poids. Ainsi, pendant toutes les descentes du piston, l'eau est refoulée dans le tuyau d'ascension, et pendant toutes les ascensions, le liquide y reste stationnaire. On peut, au moyen de cette machine, élever l'eau à une hauteur indéfinie ; mais la force que l'on doit appliquer au piston croît proportionnellement à cette hauteur, car, lorsqu'on abaisse le piston, il faut, pour ouvrir la soupape *m*, exercer sur la tête du piston une force égale au poids de cette soupape et à celui de la colonne d'eau qui s'appuye sur elle.

Dans les pompes aspirantes (*fig.* 181), en soulevant le piston M, l'air contenu dans le corps de pompe se dilate ; lorsque la dilatation est assez grande pour que la différence entre la force élastique de l'air renfermé dans le corps de pompe et celle du tuyau d'aspiration puisse vaincre le poids de la soupape *m*, l'air du tuyau d'aspiration passe dans le corps de pompe, et l'eau du réservoir s'élève, dans le tuyau d'ascension, jusqu'à une certaine hauteur correspondante à la dilatation occasionnée par la course totale du piston : par exemple, si l'espace décrit par le piston est le quart du volume total du tuyau d'aspiration et du corps de pompe au-dessous du piston à l'origine du mouvement, l'air occupera les $\frac{5}{4}$ de son volume primitif; par conséquent, sa force élastique sera à ce qu'elle était d'abord comme 4 est à 5 ; or, comme l'air extérieur

fait équilibre à une colonne d'eau de $10^m,4$ (32 pieds), l'air intérieur ne pourrait faire équilibre qu'au $\frac{4}{5}$ de ce poids, c'est-à-dire à $8^m,3$; par conséquent, l'eau s'élèvera dans le corps de pompe à une hauteur telle que le poids de la colonne d'eau, plus la force élastique de l'air du corps de pompe, fasse équilibre à la pression de l'air ; cette hauteur sera moindre que $2^m,1$, différence entre $10^m,4$ et $8^m,3$, attendu que l'eau en s'élevant diminue l'espace occupé par l'air et, par conséquent, augmente sa force élastique. Lorsque le piston, parvenu au sommet de sa course, commencera à descendre, l'air du corps de pompe se condensera, la soupape *m* se fermera, l'air situé au-dessous d'elle restera dilaté, et la colonne d'eau soulevée restera à la même hauteur. Le piston M, continuant à descendre, condensera toujours davantage l'air du corps de pompe, et il arrivera nécessairement un instant auquel sa densité sera plus grande que celle de l'air atmosphérique ; car, dans l'ascension, une partie de l'air du tuyau d'aspiration s'est introduit dans le corps de pompe ; il contient donc plus d'air qu'à l'origine du mouvement ascendant et, par conséquent, avant le retour du piston à sa position initiale, l'air aura dû atteindre sa densité primitive ; au delà, la force élastique allant en croissant, la soupape *m'* sera soulevée, et une partie de l'air se dégagera. A chaque nouvelle ascension du piston, l'air du tuyau d'aspiration se dilatera davantage, la colonne d'eau soulevée s'élèvera, bientôt elle aura atteint la soupape *m* ; à cette époque l'eau commencera à s'introduire dans le corps de pompe, et si le piston est à une hauteur au-dessus du niveau inférieur plus petite que $10^m,40$, l'eau finira par passer au-dessus de la tête du piston en soulevant la soupape *m'*, et pourra alors être portée à une hauteur quelconque.

Dans les pompes aspirantes et foulantes (*fig.* 182) les mouvemens alternatifs du piston déterminent, comme dans les pompes simplement aspirantes, l'ascension de l'eau au-dessus de la soupape *m* ; mais le liquide arrivé à cette hauteur est refoulé à chaque descente du piston dans le tuyau latéral d'ascension : ici l'air comprimé produit le même effet que l'eau dans les pompes foulantes (*fig.* 180).

Les trois appareils que nous venons de décrire sont intermittens,

c'est-à-dire, que l'eau n'est élevée dans le tuyau d'ascension que pendant un des deux mouvemens alternatifs du piston, pendant l'ascension dans les pompes aspirantes et pendant la descente dans les pompes foulantes et les pompes foulantes et aspirantes. On peut rendre l'écoulement de l'eau continu, 1° en employant deux pompes jumelles dont les pistons se meuvent en sens contraires; 2° au moyen d'un réservoir d'air A (*fig.* 183) adapté au tuyau d'ascension: pendant la descente du piston, l'eau s'élève dans le tuyau d'ascension, en même temps l'air du réservoir est comprimé, et, lorsque la soupape *m'* se ferme, la force élastique de l'air comprimé, réagissant sur l'eau, prolonge son écoulement pendant la durée de l'ascension du piston.

309. *Fontaine de Compression.* Cet appareil se compose (*fig.* 184) d'un réservoir A, en verre ou en métal, garni supérieurement d'une douille à laquelle est adapté un robinet D et un tube B C, ouvert par les deux bouts et plongeant jusqu'au fond du vase. Le robinet peut recevoir une pompe foulante G F, et un ajutage conique E traversé par un canal capillaire. Pour se servir de cet appareil on commence par remplir d'eau le réservoir A, au moyen d'un entonnoir qu'on introduit dans l'ouverture du robinet, ensuite on adapte la pompe foulante G F; le robinet D étant ouvert, on abaisse le piston, l'air du corps de pompe passe dans le tuyau B C, remonte à travers l'eau, et vient se loger dans la partie supérieure du réservoir d'où il ne peut plus sortir; alors on ferme le robinet D, et on relève le piston, aussitôt qu'il est parvenu au sommet de sa course, ou qu'il a dépassé l'ouverture O, qui fait communiquer l'intérieur du corps de pompe avec l'air extérieur: le corps de pompe se remplit d'air; on abaisse de nouveau le piston, et lorsqu'il est au delà de l'ouverture O, on ouvre le robinet D. L'air du corps de pompe, dont la compression va toujours en augmentant, n'ayant plus d'autre issue, s'introduit encore dans le réservoir en passant par le canal B C. Lorsque l'on est parvenu, en réitérant cette opération, à renfermer dans le réservoir une quantité suffisante d'air pour qu'il ait acquis une grande force élastique, on ferme le robinet D, on enlève la pompe et on la remplace par un ajutage conique E; si alors on ouvre le robinet D, la force élastique de l'air du

réservoir agissant sur la surface du liquide, le fait jaillir par le tuyau de l'ajutage à une hauteur plus ou moins considérable, mais qui va continuellement en diminuant, attendu que l'eau qui s'échappe, cédant sa place à l'air, celui-ci diminue continuellement de force élastique.

B. *Appareils hydrauliques dont le jeu est fondé sur la pression de l'air.*

310. *Siphon.* Soit A (*fig.* 185) un vase plein d'un liquide quelconque, et B C D un tube recourbé ouvert par les deux bouts, rempli du même liquide, et dont une des branches est plongée dans le vase; la pression de l'air qui agit sur la surface du liquide tend à faire monter le liquide vers le point C; la force élastique de l'air qui agit de bas en haut sur le liquide du tube à son extrémité D, tend également à faire remonter vers le point C la colonne du liquide C D; or, comme la différence de hauteur des points E et D est en général trop petite pour que la différence des forces élastiques de l'air soit appréciable, nous les regarderons comme égales et, par conséquent, comme se faisant mutuellement équilibre. La colonne C E tend à redescendre dans le vase par son poids, et la colonne liquide C D tend aussi à s'échapper par l'ouverture D par la même cause; or, si la hauteur de la colonne C D est plus grande que celle de la colonne C E, le liquide s'écoulera par l'ouverture D; et comme, à mesure que le liquide s'écoule, la pression de l'air qui agit sur la surface du liquide renfermé dans le vase maintient le siphon plein, le vase se videra jusqu'à ce que le niveau du liquide soit descendu à la hauteur du point D. Il est évident que le siphon ne peut produire son effet qu'autant que la distance du point C, au-dessus du niveau du liquide, est moindre que 32 pieds, si le liquide est de l'eau, et en général plus petite que la hauteur à laquelle le liquide s'élèverait dans un tube vide fermé par son extrémité supérieure et plongé par l'autre dans ce liquide.

On peut remplir le siphon de plusieurs manières: 1° après avoir plongé une des branches dans le vase, en aspirant par l'autre; pour éviter que le liquide n'arrive dans la bouche, on soude à l'extrémité de la branche exté-

rieure du siphon un tube capillaire *a b* (*fig.* 186) par lequel on aspire en tenant fermée l'ouverture D; 2° on peut remplir directement le siphon en le tenant renversé et incliné de manière que les deux extrémités des branches soient au même niveau (*fig.* 187); on ferme l'ouverture D avec le doigt et on le place dans le vase. Si le siphon avait un grand diamètre, le liquide de la petite branche ne pourrait pas rester suspendu, il s'échapperait en même temps que l'air s'élèverait dans le tube; il faudrait alors garnir l'extrémité B d'une soupape, qui s'ouvrirait de bas en haut lorsque le siphon serait dans sa position naturelle.

On emploie les siphons pour faire passer un liquide d'un vase dans un autre (*fig* 185, 186), pour établir un niveau constant dans plusieurs vases (*fig.* 188), et pour vider un vase lorsque le liquide y est parvenu à une certaine hauteur. M (*fig.* 189) est un vase percé à la partie inférieure d'un orifice à travers lequel passe le syphon *a b c*. Lorsque l'on verse un liquide dans le vase, il s'élève à la même hauteur dans la branche *a b* du siphon, parce que l'air s'échappe par l'extrémité *c*; mais aussitôt que le liquide a atteint le point *b*, le siphon se remplit, et le liquide du vase s'écoule jusqu'à ce que son niveau soit descendu au point *a*. La *fig.* 190 offre une disposition différente dont l'effet est le même; *b c* est un tube droit, ouvert par les deux bouts, et qui est scellé dans l'ouverture pratiquée au fond du vase; il est recouvert par un tube d'un plus grand diamètre fermé à la partie supérieure; l'intervalle qui sépare les deux tubes, remplit le même objet que la branche *b a* du siphon dans la *fig.* 189, et lorsque le niveau du liquide dans le vase a atteint le point *b*, l'écoulement du liquide commence et se continue jusqu'à ce que le niveau soit arrivé au pied de la cloche qui enveloppe le tube.

311. *Tâte-vin.* Cet appareil, dont on fait dans le commerce un fréquent usage pour soutirer par la bonde d'un tonneau une partie du liquide qu'il renferme, est composé d'un tube cylindrique *a b* (*fig.* 191) en verre ou en métal, terminé supérieurement et inférieurement par un orifice capillaire. Lorsque l'on plonge ce tube dans un liquide, les orifices *m* et *n* étant ouverts, le liquide s'introduit dans le tube et s'y élève au même niveau que le liquide extérieur; si alors on ferme avec le doigt

l'orifice m, et que l'on enlève l'appareil, une partie du liquide renfermé dans le tube s'écoulera par l'orifice n; mais comme l'air ne peut pas y rentrer, celui qui y était renfermé se dilatera, perdra de sa force élastique, et la différence entre la pression de l'air extérieur qui agit sur l'orifice n, et la pression de l'air dilaté qui agit en sens contraire, soutiendra dans le tube le reste du liquide.

Dans chaque cas particulier il sera facile de déterminer la quantité de liquide qui s'écoulera, lorsque l'on connaîtra l'espace occupé par l'air, par le liquide, et la densité de ce dernier; en effet, supposons que le tube soit cylindrique (*fig.* 192), que a soit l'espace occupé par l'air, b celui qui est rempli de liquide, et que d soit la densité du liquide, la force élastique de l'air est de 0,75 de mercure ou de $10^m,4$ d'eau; lorsque après avoir fermé l'orifice m, on soulève l'appareil, le liquide descend d'une quantité x, la force élastique de l'air est égale à $10^m,4 \times \frac{a}{a+x}$ (286). Sa différence avec celle de l'air est de $10^m,4\left(1-\frac{a}{a+x}\right)$; or, comme cette différence doit être égale au poids du liquide restant, poids qui est exprimé par $(b-x)\,d$, on obtiendra une équation du premier degré, d'où l'on déduira facilement la valeur de x lorsqu'on connaîtra a, b et d. Il faudra ensuite diminuer cette valeur de x de l'effet de la capillarité qui, seule, maintiendrait le liquide à une certaine hauteur, les deux orifices étant ouverts.

312. *Ludion.* On désigne sous ce nom un petit appareil fort ingénieux, dont les charlatans des places publiques font souvent usage pour amuser les spectateurs; cet appareil se compose (*fig.* 193) d'une boule m, communiquant avec une autre plus petite n remplie de mercure et destinée à lester la première; la boule m est percée à sa partie inférieure d'un orifice très-capillaire a; on introduit cet appareil dans un vase M, en partie plein d'eau, que l'on ferme hermétiquement avec une vessie maintenue par un fil qui s'enroule autour de son rebord; lorsqu'on presse sur la vessie qui ferme la cloche, on comprime l'air qu'elle renferme; cette pression se transmet au liquide et par suite à l'air renfermé dans la boule m. Alors une certaine portion de liquide s'introduit dans la boule par l'orifice capillaire a, l'appareil devient plus lourd et descend; mais aussitôt que l'on arrête la pression sur la vessie, l'air de la cloche, et par conséquent celui de la boule, reprend son volume primitif, et la boule remonte. On peut ainsi à volonté faire monter et descendre cet appareil par la seule application du doigt sur la vessie. Mais ce phénomène n'a lieu qu'autant

que la hauteur de la cloche ne dépasse pas certaines limites ; en effet, lorsque la boule descend, il s'introduit continuellement une nouvelle quantité d'eau, due à la pression du liquide supérieur ; or, lorsqu'on cesse de presser sur la vessie il ne sort de la boule que la quantité d'eau qui s'était introduite d'abord, et celle due à la hauteur du liquide reste ; donc, si cette dernière est telle que son poids rende l'appareil plus lourd qu'un égal volume d'eau, l'appareil ne remontera pas.

313. *Fontaine intermittente.* Cet appareil (*fig.* 194) est composé d'un ballon de verre A, garni de tubulures capillaires *g* et *h* ; dans le col du ballon se trouve un tube droit *c d*, ouvert par les deux bouts. Le col du ballon s'engage dans une douille placée au centre d'un réservoir circulaire B. La douille est garnie d'un orifice circulaire *e* et ne communique pas avec le réservoir ; ce dernier est percé d'un orifice *f*. On commence par enlever le ballon, on le renverse et on le remplit d'eau ; on le remet ensuite dans la douille, le liquide s'écoule par les orifices capillaires ; mais bientôt le liquide écoulé ferme l'orifice *e*, et, comme l'air ne peut pas entrer dans le ballon et que les orifices *g* et *h* sont capillaires, l'écoulement cesse, jusqu'à ce que l'eau soit passée dans le réservoir par l'ouverture *f*. L'accès de l'air dans le ballon, par l'orifice *e*, produit encore un nouvel écoulement qui s'arrête encore par la même cause jusqu'à ce que le liquide du ballon soit descendu au niveau des orifices *g* et *h*.

314. *Fontaine de Héron.* Cet appareil, réduit à sa disposition la plus simple, est composé (*fig.* 195) de trois réservoirs : A, B, C. Le premier est ouvert, les deux autres sont hermétiquement fermés de manière à ne point communiquer avec l'air ; la partie inférieure du premier communique avec la partie inférieure du second par le tube *a b* ; la partie supérieure du second communique avec la partie supérieure du troisième par le tube *c d* ; enfin, le dernier communique, par sa partie inférieure, avec l'air au moyen du tube *e f*, terminé supérieurement par un orifice capillaire. Supposons que les réservoirs A et C soient pleins d'eau et le réservoir B plein d'air. Le premier étant ouvert, l'eau qu'il renferme s'écoulera dans le réservoir B ; l'air de ce dernier passera dans le réservoir C, et la pression qui en résultera fera



jaillir l'eau du réservoir C par l'orifice capillaire *f*; lorsque le jet aura atteint son maximum d'élévation, la pression de l'air dans les réservoirs B et C sera égale au poids d'une colonne liquide ayant pour hauteur la différence du niveau du liquide dans les deux réservoirs A et B. L'eau devra donc jaillir par l'orifice *f* à une hauteur égale à cette différence de niveau, et durer jusqu'à ce que le réservoir B soit rempli, où que le niveau du réservoir C soit descendu au-dessous du pont *e*. On dispose ordinairement ces réservoirs d'une manière plus commode (*fig.* 196), les mêmes lettres indiquent les mêmes objets que dans la figure précédente; le jet alimente lui-même le réservoir supérieur; lorsque l'on veut vider le réservoir B et remplir le réservoir C, il suffit de renverser l'appareil; en effet, l'air rentre dans le réservoir B par le tube *a b*, l'eau qu'il renfermait s'écoule dans le réservoir C par le canal *c d*, et l'air rentre dans ce dernier par le canal *e f*. On construit quelquefois des fontaines de héron avec un simple tube de verre garni de boules; (*fig.* 197) l'espace AB est plein d'eau, l'espace BC plein d'air, et l'espace CD plein d'eau; la pression de la colonne d'eau AB se transmet à la colonne d'air BC, et de cette dernière à la surface du liquide C, qui, par conséquent, doit jaillir par l'orifice *f* à une hauteur égale à A B.

On a fait de la fontaine de héron deux applications importantes que nous allons successivement examiner; la première est la machine de Schemnitz, destinée à élever les eaux des galeries d'une mine de sulfure de plomb; la seconde, les lampes hydrostatiques.

315. *Machine de Schemnitz.* A (*fig.* 198) est un réservoir d'eau alimenté par une source, L un bassin contenant l'eau qu'on doit élever, B et C sont deux récipiens placés, le premier au niveau du sol, le second au-dessous du niveau des eaux inférieures; le premier communique avec le réservoir A par le tuyau *b b*, et avec l'air par les tubes *a a* et *dd*; le second récipient C, d'une capacité moitié de celle de B, communique avec le bassin L par le tube *l l*, avec l'air extérieur par les tubes *pp*, *n n*, et avec le récipient B par le tuyau *h h*. Pour mettre cette machine en jeu, on ouvre en même temps les robinets *k* et *m*, le récipient C s'emplit d'eau par *l l*, et l'air s'échappe par *pp*; lorsque le

récipient est rempli d'eau, on ferme ces robinets, on ouvre ceux indiqués par les lettres *c* et *g*, et on ferme les robinets *e* et *f*; le récipient B s'emplit d'eau par *b b*, l'air qu'il contient presse l'eau du récipient C et l'oblige à s'élever jusqu'en O. Le récipient C étant vide d'eau, on ouvre en même temps les robinets *k*, *m*, *e*, *f*, et on ferme les robinets *c*, *g*, le récipient B se vide d'eau par *d d*, et s'emplit d'air par *a a*, en même temps le récipient C s'emplit d'eau par *l l*, et se vide d'air par *p p*; fermant les robinets *k*, *m*, *e*, *f*, et ouvrant les robinets *c*, *g*, l'eau du récipient C s'élève de nouveau par *n n* jusques O. Dans la machine établie en 1755 les robinets étaient mis en mouvement par des hommes; mais en 1796 M. Boswel proposa de les faire mouvoir par une chute d'eau.

316. *Lampe Hydrostatique.* Cette lampe, imaginée par M. Girard, a un grand avantage sur les lampes ordinaires, 1° parce que le réservoir d'huile étant au-dessous de la mèche, il ne porte point d'ombre sur les corps environnans; 2° parce que l'ascension de l'huile ayant toujours lieu par une force constante, l'intensité de sa lumière ne varie pas. Ces avantages sont les mêmes que ceux des lampes de Carcel et de Gagniaud, dans lesquelles le réservoir d'huile est également au-dessous de la mèche, et d'où l'huile s'élève par un mouvement de pendule.

La lampe hydrostatique est composée de trois réservoirs C, C', C'' (*fig.* 199). Le récipient C communique avec l'air au moyen du tube *a b* qui plonge jusqu'au fond; sa partie inférieure communique avec le récipient C' par le tube *c d*; les récipiens C' et C'' communiquent par le tube recourbé *e f g*; enfin, le récipient C'' communique avec l'air au moyen du tube *i k*. C'est à l'extrémité de ce dernier tube que se trouve la mèche de la lampe. Supposons le réservoir C rempli d'huile, ce liquide s'écoulera dans le réservoir C' par le tuyau *c d*, et à mesure que cet écoulement aura lieu, l'air rentrera par le tube *b a*; la force élastique de l'air du récipient C sera donc toujours moindre que la pression de l'atmosphère, de la hauteur du liquide au-dessus de l'orifice *a*; le liquide tendra donc à s'écouler dans le réservoir C' avec une force égale au poids d'une colonne liquide ayant pour hauteur la distance des niveaux des réservoirs C et C', moins la différence entre la force élastique de

l'air et celle du récipient C. Or, comme cette différence est égale à la hauteur du liquide, au-dessus du point *a*, et que les points *c* et *a* sont au même niveau, il s'ensuit que la force avec laquelle le liquide s'écoulera dans le réservoir C' est égale au poids de la colonne liquide ayant pour hauteur la distance du point *c* au niveau du liquide dans le vase C'; de sorte que si ce dernier niveau était constant, la pression le serait également. Pour remplir cette condition, on environne l'extrémité inférieure *d* du tube *c d* d'un cylindre fermé par le bas et ouvert par la partie supérieure; le liquide qui s'écoule s'élève entre le tube et le cylindre, et se verse ensuite dans le réservoir C' par les bords du cylindre: la pression constante dans le vase C' est donc mesurée par le poids de la colonne liquide *c m*. Si le récipient C' était exactement fermé, l'écoulement du liquide du récipient C cesserait aussitôt que l'air qu'il renferme aurait acquis une force élastique capable de faire équilibre à la pression *c m*; mais la partie supérieure du vase C' communique avec le récipient C'', au moyen du tube *e f g*; par conséquent, une partie de l'air du récipient C' passera dans le récipient C'', et la force élastique de l'air de ce récipient sera bientôt égale à celle du récipient C', moins le poids de la colonne liquide *n g*. De sorte que le liquide du vase C'' s'élèvera au-dessus de son niveau dans le tube *k i* à une hauteur égale à *c m*, moins *n g*, et les points *g* et *i* étant dans le même plan horizontal, le liquide sera élevé au-dessus du point *i* à une hauteur constante égale à *c m*. Si le tube *k i* avait une longueur plus grande que *c m*, aussitôt que le liquide aurait acquis son maximum de hauteur, l'écoulement cesserait, tout resterait en équilibre; mais si le tube *k i* est plus petit que *c m*, le liquide s'élèvera au-dessus du point *k*, déversera dans la cuvette *p q*, et l'écoulement continuera sous la même pression, jusqu'à ce que le vase C soit vide. Lorsque les récipiens C et C'' sont vides et que le réservoir C' est plein, il faut remplir les deux premiers, et vider le dernier; on y parvient de la manière suivante: le tube *k i* se démonte à vis en o, on verse alors par cet orifice de l'huile dans le vase C''; l'air s'en dégage par la même ouverture; on vide le récipient C' par le robinet *u*, l'air rentre par le tube *b a*; enfin, on remplit

le vase C en versant de l'huile par le tube *ba*, et ouvrant le tube *st* pour laisser dégager l'air.

C. *Machines mues par le vent.*

317. L'air atmosphérique, quoique pesant et élastique, ne peut, lorsqu'il est en repos, imprimer aucun mouvement, parce que l'on ne peut prendre du mouvement que dans un moteur qui se meut; sous ce rapport, il en est de l'air comme de l'eau, ces deux fluides ne deviennent forces motrices que quand ils se déplacent. Lorsqu'une masse d'air est en repos, on peut lui faire acquérir une force motrice en le comprimant dans un espace clos, d'où on le laisserait ensuite sortir, ou en le mettant en mouvement d'une manière quelconque; mais les forces qui devraient-être employées étant plus grandes que celles que l'on pourrait retirer ensuite de ce moteur, il serait plus avantageux de les appliquer immédiatement à la machine que l'on veut faire mouvoir. Mettre de l'air en mouvement par une force étrangère pour le faire agir ensuite sur une machine, serait une opération aussi absurde que celle qui élèverait de l'eau au moyen d'une pompe, pour la faire agir ensuite sur une roue.

318. Lorsque l'air se déplace à la surface du globe, il renferme une certaine quantité de mouvement que l'on peut faire passer dans des machines, de la même manière que l'on s'empare d'une partie de la force motrice d'un courant ou d'une chute d'eau pour faire tourner des roues à godet ou à palettes.

319. Les machines mues par le vent sont de deux espèces, 1° celles qui reçoivent directement son action, et acquièrent un mouvement de translation rectiligne; 2° celles qui ne changent pas de lieu, et reçoivent du vent un mouvement alternatif ou de rotation. Les premières sont les plus simples, elles se composent de surfaces planes d'une grande étendue, que l'on place dans la direction du vent, telles sont les voiles d'un navire. La direction et la vitesse du navire dépendent de trois choses, de la direction et de la vitesse du vent, de la direction des voiles et de celle de la quille; en effet, le choc du vent contre une voile se

décompose d'abord en deux forces rectangulaires, une, parallèle à sa surface, qui est sans action; l'autre, perpendiculaire, qui produit une partie de son effet : cette dernière se décompose encore en deux parties, l'une perpendiculaire à la quille, qui est détruite par la résistance de l'eau dans cette direction ; l'autre, parallèle à la quille, qui obtient tout son effet. Les machines qui ne doivent pas changer de lieu pourraient être formées d'une voile fixée au bout d'une tige horizontale ou verticale, mobile autour de l'autre extrémité; la voile, après avoir décrit un certain arc de cercle par l'action du vent, devrait se replier sur elle-même, revenir par un contre-poids au point de départ, d'où elle se développerait, pour parcourir de nouveau le même espace, revenir encore à l'origine du mouvement, et ainsi de suite : on obtiendrait par là un mouvement de rotation alternatif, que l'on communiquerait facilement en le transformant, si cela était nécessaire, à une machine quelconque. On ne pourrait pas employer pour recevoir l'action du vent des roues semblables à celles qui reçoivent l'action de l'eau; une roue, par exemple, dont la circonférence serait garnie de voiles parallèles, et qui recevrait l'action du vent dans la direction du plan de la roue, ne pourrait pas être mise en mouvement; car les actions de l'air sur la partie supérieure et sur la partie inférieure de la roue tendraient à la faire tourner dans un sens contraire, et, par conséquent, elle resterait immobile. Il faudrait pour que la roue fût mise en mouvement, que la partie supérieure ou inférieure de sa circonférence fût encaissée de manière à être soustraite à l'action du vent. La meilleure de toutes les machines à vent, celle à laquelle l'on serait conduit par la théorie, est la machine employée depuis long-temps sous le nom de *Moulin à Vent*. Ces machines se composent, comme on sait, d'un axe incliné à l'horizon, à l'extrémité duquel se trouvent deux tiges perpendiculaires entre elles et à l'axe, et qui sont garnies de voiles inclinées. L'axe est mobile, et peut être tourné de manière que le plan de rotation des ailes soit perpendiculaire à la direction du vent. Le choc du vent, contre les voiles, se décompose en deux forces rectangulaires; l'une, perpendiculaire à la surface, qui ne produit qu'une pression détruite par la résistance de la

machine; l'autre, parallèle à la surface de la voile, qui produit la rotation, car cette dernière force est toujours dans le même sens, quelle que soit la position de la voile. Dans la plupart des moulins à vent on a atteint depuis long-temps toute la perfection désirable; l'inclinaison de l'axe, celle des voiles, leur nombre, leur étendue, sont tels que la théorie et des expériences faites avec le plus grand soin l'auraient indiqué.

Les machines mues par le vent ont sur les machines mues par des courans d'eau, plusieurs avantages importans. Partout il y a des courans d'air, partout on peut établir de ces machines, et rien ne limite le nombre et la puissance des machines à vent qui peuvent exister même dans un espace très-resserré; mais l'inégalité de leur mouvement, conséquence nécessaire de celle du moteur, et l'incertitude de leur travail, rendent ces machines bien moins avantageuses que celles qui sont mues par un cours d'eau; de sorte que ce n'est jamais qu'à défaut de celles-ci qu'on a recours aux premières.

§ V.

L'air considéré comme véhicule du Son.

A. *Production et propagation du Son.*

320. Le son est l'impression produite sur l'organe de l'ouïe par les oscillations rapides des corps élastiques, oscillations qui se transmettent de proche en proche par les corps intermédiaires.

Les sons proviennent des corps élastiques, car tous les corps élastiques sont sonores, et ils le sont d'autant plus qu'ils sont plus élastiques. Les sons se forment dans ces corps lorsque leurs différentes parties ont des mouvemens relatifs; car ce n'est qu'en ébranlant ces corps, de manière à leur imprimer cette sorte de mouvement, qu'on parvient à leur faire rendre des sons. Ces mouvemens sont oscillatoires; car si l'on approche une pointe d'un corps solide en mouvement, on entend des chocs successifs. Les oscillations des corps sonores se transmettent à l'organe de

l'ouïe par l'air, ou par les autres corps élastiques ; car si l'on place dans un ballon à robinet A (*fig.* 200) une petite clochette *m*, suspendue par un corps mou, tel que du plomb ou des fils de chanvre non tordus, et que l'on fasse le vide dans le ballon en agitant l'appareil de manière à faire frapper le marteau sur le timbre, on ne distinguera aucun son; tandis que si le ballon est plein d'air, de vapeurs d'eau ou de tout autre gaz, ou si la tige qui soutient le timbre est élastique, le son produit se transmettra facilement au dehors.

321. *Oscillations des Corps sonores.* Lorsqu'un corps élastique a changé de forme par une cause quelconque, il tend à la reprendre en faisant autour d'elle une série d'oscillations analogues à celles d'un pendule dérangé de sa position verticale. Ces oscillations sont sensiblement isochrones; mais leurs amplitudes diminuant continuellement, s'anéantissent après un temps plus ou moins long. Nous indiquerons bientôt un moyen très-exact d'estimer la durée de ces oscillations. En attendant, nous annonçons, par anticipation, que le caractère de gravité ou d'acuité des sons réside uniquement dans la vitesse de ces oscillations; que les corps rendent des sons d'autant plus aigus que leurs oscillations sont plus rapides; que les oscillations d'un corps élastique ne peuvent produire de son qu'autant que l'oreille ne peut pas les distinguer individuellement, et que le son le plus grave que nous puissions saisir est celui que produit un corps élastique faisant 32 oscillations par seconde. Les oscillations plus rapides portent le nom de *Vibrations.* Nous nous servirons désormais de cette expression pour désigner les oscillations sonores des corps élastiques.

322. *Mode de propagation du Son.* Les corps élastiques sont les seuls qui soient sonores ; ce sont aussi les seuls qui propagent les sons. Nous examinerons d'abord la propagation du son dans l'air.

Considérons dans l'espace un plan matériel à l'extrémité d'une colonne cylindrique d'air indéfinie et homogène, et supposons que ce plan soit poussé instantanément en avant d'une quantité très-petite ; divisons par la pensée l'air vers lequel il s'avance en couches infiniment minces. La première, choquée par l'excursion du point matériel, se con-

densera subitement; alors, en vertu de la force élastique qu'elle a acquise, elle reviendra à sa densité primitive, en comprimant la couche d'air suivante; celle-ci, après avoir cédé à la force élastique de la première, agira de la même manière sur celle qui vient après, et ainsi de suite: de sorte que les couches d'air qui sont au delà du plan matériel ébranlé, éprouveront successivement une condensation et un retour à leur volume primitif; tout se passera alors comme si une couche d'air infiniment mince se mouvait parallèlement à elle-même en éprouvant successivement des condensations et des retours à sa densité primitive. Si maintenant le plan mobile revient sur lui-même instantanément, il produira dans la couche d'air contiguë une dilatation, qui se communiquera successivement aux couches suivantes de la même manière que les condensations provenant de l'excursion primitive: ainsi chaque excursion produira une onde condensée, et chaque retour une onde dilatée. Nous venons de supposer que les vibrations du plan se faisaient instantanément; mais il n'en est jamais ainsi: la durée de chaque vibration est toujours très-petite, mais elle est finie. Pour ramener ce cas à celui que nous avons examiné d'abord, divisons la couche d'air dans laquelle la vibration du plan s'étend en un grand nombre de tranches extrêmement minces: chacune d'elle sera choquée successivement par le plan pendant son excursion, et comme la vitesse avec laquelle se propagent les condensations et les dilatations des couches d'air, est très-grande relativement à la vitesse des vibrations du corps sonore, il en résulte qu'à l'instant où une des tranches que nous avons considérée, sera choquée par le plan, elle aura déjà propagé les ondes provenant du choc contre les tranches qui la précèdent, et sera revenue à l'état de repos; par conséquent, chaque tranche produira une onde semblable à la première, et l'excursion totale du plan produira une série de petites ondes élémentaires, alternativement condensées, consécutives, et dont la longueur totale sera égale à l'espace parcouru par la première pendant la durée de la vibration: par la même raison, le retour du plan dans sa position initiale donnera naissance à une série d'ondes élémentaires, alternativement dilatées, consécutives, et de même longueur, et la suite des vibrations du plan produira, dans

la colonne d'air, une suite d'ondes sonores, de même longueur, dont le nombre sera égal à celui des vibrations; ces ondes, placées à la suite les unes des autres, sont composées de petites ondes élémentaires, alternativement condensées dans l'une, et dilatées dans la suivante: de sorte que tout se passe comme si une lame d'air d'une épaisseur égale à l'espace parcouru par le son pendant une des vibrations du plan, se mouvait parallélement à elle-même, était divisée en tranches extrêmement minces, alternativement condensées dans les unes et dilatées dans la suivante. Nous venons de considérer la propagation du son dans un espace cylindrique; il est facile d'en déduire le mode de propagation dans un espace illimité. Les vibrations se propageraient dans tous les sens; de sorte que si, par exemple, le corps vibrant était une sphère dont le rayon augmenterait ou diminuerait alternativement, les ondes sonores seraient sphériques, et comme les ondes augmenteraient de masse à mesure qu'elles s'éloigneraient du centre d'ébranlement, l'intensité des condensations et des dilatations irait en s'affaiblissant continuellement, et s'anéantirait au delà d'une certaine limite.

323. *Vitesse du Son dans l'air.* En soumettant à l'analyse le mode de transmission du son que nous venons de décrire, on a trouvé, 1° que dans une masse d'air de température constante, la vitesse était uniforme; 2° que la vitesse restait la même, quelle que fût la densité du gaz dans lequel se fait la propagation; 3° que la vitesse du son était entièrement indépendante de l'intensité et de la qualité du son; 4° et que dans l'air atmosphérique à la température de 6°, le son devait parcourir 282ᵐ42 par seconde. Tous ces résultats sont confirmés par l'expérience, à l'exception du dernier.

En 1738, les membres de l'Académie des Sciences firent de nombreuses expériences pour déterminer la vitesse du son entre Montlhery et Montmartre, dont la distance est de 29,000ᵐ: le signal se faisait par des coups de canon; des observateurs placés à différentes distances et sur la même ligne droite, marquaient le temps écoulé depuis l'apparition de la lumière jusqu'à l'arrivée du son; ils avaient ainsi le temps employé par le son pour arriver jusqu'à eux, car la vitesse de la lumière

étant excessivement grande par rapport à celle du son, la durée de la transmission de la lumière peut être regardée comme nulle. En comparant ces observations, on a reconnu, 1° que la vitesse du son était uniforme, c'est-à-dire, que dans un temps double il parcourait un espace double, et qu'en général l'espace parcouru était proportionnel au temps; 2° que la vitesse absolue était la même, que le temps fût couvert ou serein, clair ou brumeux, que la pression barométrique fût grande ou petite, pourvu que l'air fût tranquille; mais, que si l'air était agité par le vent, la vitesse du vent, décomposé suivant la direction de la ligne sonore, augmentait ou diminuait de toute sa valeur la vitesse du son (1). Enfin, la vitesse du son à la température de 6° a été trouvée de 337^{m},18, et des observations faites en 1822, par ordre du bureau des longitudes, donnent pour la vitesse réelle 337^{m},2 à la température de 10°. La différence qui existe entre les résultats de la théorie et ceux de l'expérience proviennent de ce que dans les condensations successives qui se manifestent pendant la propagation du son, il se développe de la chaleur, qui augmente la force élastique de l'air et accélère la vitesse, et que dans le calcul on n'a point eu égard à cette cause d'accélération.

Enfin, une expérience journalière démontre, avec la dernière évidence, que tous les sons, quelque graves ou aigus qu'ils soient, se propagent avec la même vitesse dans les mêmes circonstances; en effet, lorsqu'on exécute un air sur un instrument, l'impression produite sur nos organes dépend non-seulement de la nature et du mode de succession des sons, mais encore de leur durée relative. Or, à quelque distance que l'on se place, pourvu que les ondes sonores y arrivent, le chant n'est point altéré; il en résulte que la durée relative des sons reste toujours

(1) Soit (*fig.* 201) A B la direction de la ligne sonore, C D celle du vent. On peut décomposer cette dernière force en deux autres; l'une, parallèle à A B, l'autre, perpendiculaire; en représentant l'intensité du vent par V, la composante suivant A B, sera $V\cos a$, et la composante suivant A D, sera $V\sin a$. Comme cette dernière force ne peut avoir aucune influence sur une autre qui lui est perpendiculaire, la vitesse du son ne sera modifiée que par la première; elle l'augmentera de toute sa valeur, si la vitesse du vent est dans le sens de la vitesse du son, et la diminuera également de toute sa valeur dans le cas contraire.

la même, et, par conséquent, que la vitesse de transmission est la même pour tous les sons.

Quant à la diminution d'intensité du son, elle est une conséquence nécessaire du mode de propagation; car lorsqu'on ébranle un lieu quelconque de l'atmosphère, le son se propage dans tous les sens; par conséquent, les ondes sonores enveloppent le point ébranlé, et sont terminées par des surfaces parallèles: la masse de l'onde sonore croît donc avec une grande rapidité à mesure qu'elle s'éloigne du centre d'ébranlement, et, par conséquent, l'intensité des vibrations doit diminuer dans la même proportion; par exemple: si c'est un point unique qui est ébranlé, les ondes sonores seront sphériques et concentriques, et la propagation aura lieu de la même manière que les ondes liquides que l'on produit à la surface d'une eau tranquille par la chute d'un corps pesant. Il résulte de cette explication, que si les sons se propageaient dans une masse d'air cylindrique suivant la direction de son axe, l'intensité devrait rester constamment la même, attendu que les ondes aériennes ont partout la même masse: c'est ce qui existe en effet. D'après des expériences faites par M. Biot, l'intensité du son à l'extrémité d'un cylindre d'air de 951 mètres de longueur n'avait pas éprouvé d'altération appréciable.

Il résulte de ce qui précède, que si la température de toutes les couches de l'atmosphère était la même, la vitesse du son serait aussi la même dans tous les sens; mais comme les couches de l'atmosphère sont d'autant plus froides qu'elles sont plus élevées, il en résulte que la vitesse du son est plus grande de haut en bas que de bas en haut, et que l'intensité du son diminue au contraire plus rapidement de haut en bas qne de bas en haut.

324. *Réflexion du Son.* Lorsque des ondes sonores rencontrent un obstacle fixe, le calcul démontre qu'elles se réfléchissent de manière à ce que l'angle d'incidence soit égal à l'angle de réflexion (1); et que

---

(1) Si l'obstacle fixe est tarminé par une surface plane A B (*fig.* 202), l'angle d'incidence est l'angle formé par l'onda incidenta C D avec le plan A B, et l'angle de réflexion est celui que fait avec le même plan l'onde réfléchie D E. Lorsque l'obstacle est terminé par une surface courbe M N (*fig.* 203), es angles d'incidence et de réflexion se comptent à partir du plan tangent A B au point d'incidence.

la vitesse de l'onde réfléchie est la même que celle de l'onde incidente. L'expérience confirme exactement ces résultats. C'est à la réflexion du son contre les montagnes, les édifices, que sont dus les échos. Lorsque le son revient à l'oreille après une seule réflexion, on ne distingue qu'une seule répétition du son émis. Mais si les ondes sonores éprouvent plusieurs réflexions, et que plusieurs de ces ondes réfléchies viennent rencontrer l'observateur, on distinguera autant de répétitions du son primitif. Lorsque l'obstacle est très-éloigné, le son réfléchi arrive à l'oreille après le son primitif, et, suivant l'intervalle qui sépare ces deux effets, l'écho répète un plus ou moins grand nombre de syllabes. Si l'obstacle est très-voisin, les sons réfléchis se confondent en partie avec les sons directs, les prolongent et les renforcent : c'est ce qui arrive dans un appartement vide. Si l'obstacle était une voûte elliptique de révolution (*fig.* 204), et que l'émission du son eût lieu à l'un des foyers, toutes les ondes réfléchies contre sa surface iraient passer par l'autre foyer; car, si d'un point quelconque de la surface, on mène une ligne à chaque foyer, elles sont également inclinées sur le plan tangent; par conséquent, à l'autre foyer le son acquerra une grande intensité.

325. ***Propagation simultanée des Ondes sonores.*** Lorsque des sons partent en même temps de différens points de l'espace, ils arrivent à l'oreille sans aucune altération; c'est ainsi, par exemple, que les sons produits par les différens instrumens d'un orchestre, n'éprouvent par leur simultanéité aucune modification, et chacun d'eux produit la même sensation que s'ils étaient successifs. Il faut nécessairement conclure de là, que les ondes sonores aériennes se propagent ensemble sans se troubler ni se confondre, ni s'altérer en aucune manière. Cette conséquence de l'observation est aussi un résultat de la théorie, et un cas particulier d'un grand principe de mécanique, connu sous le nom de *Principe de la coexistence des petites oscillations*, qui consiste en ce que, toutes les fois qu'un système quelconque est soumis à l'action simultanée de plusieurs forces qui ne lui impriment que des mouvemens très-petits, les effets qui résulteraient de l'action isolée de ces forces, existent ensemble sans se troubler ni se confondre.

Mais cette loi ne peut subsister qu'autant que les mouvemens que tendent à imprimer les forces sont très-petits : si une ou plusieurs de ces forces dépassaient un certain degré d'énergie, la coexistence dont nous venons de parler ne pourrait plus subsister. L'expérience est encore en cela parfaitement d'accord avec la théorie : lorsque deux ou un plus grand nombre de personnes élèvent beaucoup la voix, les sons deviennent confus ; il se passe alors dans l'air des phénomènes tout-à-fait analogues à ceux qui résultent de plusieurs ébranlemens à la surface d'une masse liquide en repos ; tant que les ébranlemens n'excèdent pas une certaine limite, on voit les ondes passer les unes sur les autres, sans éprouver aucune déviation ; mais si les ébranlemens sont violens, les ondes deviennent tumultueuses, et se modifient mutuellement.

326. *Transmission du Son à travers les Gaz.* En renfermant dans un ballon, un timbre, mu par un mouvement d'horlogerie, afin que l'intensité du son reste la même dans les mêmes circonstances, et faisant passer successivement dans ce ballon différens gaz, on a reconnu que l'intensité du son croissait avec la densité du gaz : mais il a été impossible de déterminer exactement la loi de ces intensités, car nous n'avons aucun moyen de mesurer numériquement l'intensité relative des sons.

327. *Transmission du Son à travers les Corps solides.* M. Delaplace a calculé la transmission du son à travers un corps solide. Les résultats sont, que la vitesse avec laquelle les sons se propagent dans les corps solides, est beaucoup plus considérable que dans l'air ; il a trouvé qu'en représentant la vitesse du son dans l'air par 1, elle était $10\,^1/_2$ dans le laiton, $4\,^1/_2$ dans l'eau de pluie, et $4\,^1/_{10}$ dans l'eau de mer. L'expérience directe a confirmé ces résultats. Bientôt nous indiquerons un moyen facile de les vérifier.

B. *Perception et comparaison des Sons.*

328. Nous avons vu que lorsqu'un corps sonore était mis en mouvement, ses vibrations se transmettaient à l'air, et que ce dernier les propageait dans tous les sens. Les ondes sonores qui viennent frapper l'organe de

l'ouïe, produisent en nous la sensation du son. Nous examinerons plus tard les principales dispositions de cet organe, et le petit nombre de notions acquises sur la manière dont s'opère la sensation.

329. Dans la perception d'un son isolé il faut distinguer la durée, l'intensité, le degré d'acuité ou de gravité, le timbre, et enfin l'accentuation.

La durée d'un son dépend de la durée totale des vibrations du corps sonore; elle lui est parfaitement égale, puisque la première et la dernière onde sonore restent le même temps pour arriver à l'organe de l'ouïe. La longueur totale de l'onde sonore est évidemment égale à l'espace parcouru par le son pendant la durée totale des vibrations.

L'intensité dépend de l'amplitude des vibrations; elle reste constante, comme nous l'avons dit, lorsque les ondes sonores se propagent dans un espace cylindrique; mais dans un espace libre, elle diminue rapidement à mesure que les ondes s'éloignent du centre d'ébranlement.

La gravité et l'acuité des sons dépendent uniquement de la vitesse des vibrations; car si l'on tend une corde métallique par ses deux extrémités, et qu'on la fasse vibrer en promenant sur elle un archet, ou en la pinçant, on remarque, que le son devient plus aigu à mesure que la longueur de la corde diminue, et qu'en même temps les vibrations deviennent plus rapides.

Le timbre est la qualité donnée au son par la nature du corps sonore, ou des corps environnans qui sont mis en vibration par lui. C'est par le timbre que les mêmes sons, sous le rapport de l'intensité et de l'acuité, rendus par divers instrumens, diffèrent les uns des autres. On ignore complétement la modification que font éprouver aux ondes aériennes les changemens de timbre.

L'accentuation est la qualité du son imprimée à l'origine de son émission par la voix humaine au moyen des consonnes. On ne connaît point non plus l'altération que l'accentuation fait éprouver aux ondes aériennes.

330. La nature des sensations qui résultent de la succession des sons et de leur coexistence, dépendent uniquement de leur degré d'acuité; car le timbre et l'intensité ne changent jamais, ni la nature d'un chant musical, ni celui d'un accord. Ces dernières qualités du son n'étant que d'un

sons des gammes. En effet, si l'on tend une corde A B de boyau ou de métal, par ses deux extrémités (*fig.* 205), le calcul démontre que si la corde reste toujours soumise à la même tension, et qu'on la mette en mouvement d'une manière quelconque, la rapidité des vibrations qui en résulteront, sera en raison inverse de la longueur de la corde (1). Supposons maintenant que la corde mise en vibration rende le son le plus grave, et qu'en raccourcissant la corde au moyen d'un chevalet, nous cherchions à produire successivement les différens sons de la gamme, et qu'à chaque son obtenu nous mesurions la longueur de la corde; en représentant la longueur totale de la corde par 1, on obtiendra pour les longueurs des cordes, et pour les vitesses relatives des vibrations les nombres suivans :

Noms des Sons rendus....................	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut.*
Longueur des Cordes......................	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{2}$
Nombre de Vibrations dans le même temps..	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

Les mêmes relations se reproduisent dans les octaves suivantes.

Ces chiffres n'indiquent que les nombres relatifs de vibrations faites dans le même temps : si on voulait avoir les nombres absolus, il faudrait prendre une corde assez longue, pour que les vibrations pussent se voir et se compter; alors, en raccourcissant suffisamment la corde, on lui ferait rendre un son de l'échelle harmonique dont le nombre de vibrations serait égal au premier multiplié par le rapport des longueurs

(1) La corde étant uniformément épaisse, le rayon de la section transversale étant r, l sa longueur, δ le poids de l'unité de volume, P désignant le poids qui produit sa tension, le nombre de vibrations faites par la corde dans une seconde, que nous représenterons par N, sera déterminé par l'équation.

$$N = \frac{\sqrt{gP}}{rl\sqrt{\pi\delta}}$$

g étant le double de l'espace parcouru par un corps pesant pendant la première seconde de sa chute, et π le rapport de la circonférence au décimètre, ainsi $g = 9^{m},8088$ et $\pi = 3,1442$. Il suit de là, que si deux cordes ne diffèrent que par leur longueur, le nombre de vibrations sera en raison inverse de leur longueur; et si elles diffèrent seulement par leur tension, le nombre de vibrations sera en raison directe des racines carrées des poids qui produisent ces tensions.

des cordes : ayant ainsi un terme de la série, les nombres précédens conduiraient facilement à la détermination de tous les autres. On pourrait encore se servir de la formule de la note précédente en mettant à la place des lettres les valeurs numériques correspondantes au cas particulier que l'on considérerait. C'est ainsi qu'on a reconnu, que le son le plus grand que nous puissions apprécier, était donné par un corps sonore faisant 32 oscillations par seconde.

Pour plus de facilité dans la pratique, on est convenu de désigner par des noms particuliers, l'intervalle qui sépare deux sons successifs de la gamme; ce mot intervalle doit être entendu, par la quantité dont le son s'élève ou s'abaisse, ou plus exactement par le rapport de leurs vibrations dans le même temps. Nous joignons ici le Tableau des noms et des valeurs des intervalles consécutifs de la gamme.

INTERVALLES successifs DE LA GAMME.	RAPPORTS de leurs VIBRATIONS.	DÉNOMINATION de CES INTERVALLES.
Ré à *Ut*...........	$\frac{9}{8}$..........	Ton majeur.
Mi à *Ré*...........	$\frac{10}{9}$..........	Ton mineur.
Fa à *Mi*...........	$\frac{16}{15}$..........	Semi-ton majeur.
Sol à *Fa*...........	$\frac{9}{8}$..........	Ton majeur.
La à *Sol*...........	$\frac{10}{9}$..........	Ton mineur.
Si à *La*...........	$\frac{9}{8}$..........	Ton majeur.
Ut à *Si*...........	$\frac{16}{15}$..........	Semi-ton majeur.

Ainsi, dans la gamme naturelle que nous avons considérée en faisant abstraction de la différence qui existe entre les tons et les semi-tons majeurs ou mineurs, il y a deux semi-tons placés, le premier, entre la troisième et la quatrième, l'autre, entre la septième et la huitième. Tous les autres sont des tons entiers, majeurs ou mineurs.

Si au lieu de commencer la gamme par *ut*, on voulait la commencer par toute autre note, il faudrait nécessairement que les intervalles successifs fussent comme dans la gamme en *ut*, d'abord de 2 tons, puis

d'un demi-ton, puis de 3, et enfin d'un demi-ton. Cette condition ne se trouvant jamais remplie, on a été obligé d'intercaler entre les sons de la gamme naturelle d'autres sons intermédiaires, qui permettent de satisfaire à la condition dont nous venons de parler. Ces sons intermédiaires portent le nom de la note inférieure, suivi du mot *Dièse*, ou de la note supérieure, suivi du mot *Bémol:* un son diésé est élevé dans l'échelle harmonique, de manière que la rapidité des vibrations est augmentée dans le rapport de 25 à 24; un son bémolisé est abaissé dans le même rapport; ainsi on obtiendra la vitesse des vibrations d'une note diésée en multipliant celle de cette note par $\frac{25}{24}$, et de même l'expression de la vitesse des vibrations d'une note bémolisée, sera égale à celle de la note fondamentale multipliée par $\frac{24}{25}$.

Il résulte de là, qu'entre toutes les notes de la gamme naturelle en *ut*, il y a 2 sons intermédiaires, qui sont: la note inférieure diésée et la note supérieure bémolisée. Ces deux sons intermédiaires diffèrent, mais ils sont très-voisins, et dans les instrumens à sons fixes, on les confond.

Une note diésée se désigne par le signe ♯ mis avant celui de la note, et une note bémolisée, par le signe ♭ placé aussi avant la note.

Il est maintenant facile de faire voir qu'au moyen des dièses et des bémols, on peut commencer une gamme par une note quelconque. En effet, faisant abstraction de la différence qui existe entre les tons et les demi-tons majeurs ou mineurs, on peut regarder les dièses et les bémols comme haussant ou baissant la note d'un demi-ton. La gamme qui commencerait par *mi*, serait:

	Mi	***Fa***	***Sol***	***La***	***Si***	***Ut***	***Ré***	***Mi***
Intervalles	$\frac{1}{2}$	1	1	1	$\frac{1}{2}$	1	1,	

Et en diésant le *fa*, le *sol*, l'*ut* et le *ré*, elle deviendra:

	Mi	***Fa***♯	***Sol***♯	***La***	***Si***	***Ut***♯	***Ré***♯	***Mi***
Intervalles	1	1	$\frac{1}{2}$	1	1	1	$\frac{1}{2}$.	

Ce qui est la succession des intervalles de la gamme naturelle.

Un chant musical n'est autre chose qu'une gamme variée qui commence par une certaine note de la gamme naturelle ; le nombre des dièses et des bémols qui sont à la clef, sont déterminés par la note qui commence la gamme. Toutes les différentes gammes, quoique formées par une succession parfaitement égale de tons et de demi-tons, ne sont point identiques, parce que les tons et les demi-tons majeurs ou mineurs se succèdent dans un ordre différent ; aussi elles produisent sur nos organes des impressions diverses.

Toutes les gammes dont nous venons de parler se désignent par le mot de *Ton*, et les tons se distinguent par la note qui commence la gamme ; ainsi, un chant en sol est une gamme variée qui commence par sol.

Indépendamment du mode de gammes dont nous venons de parler, il en existe encore un autre, dans lequel les intervalles de tons et de demi-tons se succèdent dans un autre ordre. Le premier mode porte le nom de *Mode Majeur;* le dernier celui de *Mode Mineur;* la nature de cet ouvrage ne nous permet pas d'entrer dans plus de détail à ce sujet.

331. *Des Sons simultanés.* De tous les sons simultanés, les seuls qui flattent l'oreille, sont, comme nous l'avons déjà dit, l'octave, la tierce et la quinte : ainsi, par exemple, si un instrument rend le son *ut*, les différentes octaves de ce son, ainsi que les sons *mi* et *sol*, en résonnant avec lui, produiront un effet très-agréable à l'oreille. En représentant le son fondamental par 1, le rapport des vibrations de ces différens sons, est 2 et les puissances de 2 pour les octaves ; $^5/_4$, et ce nombre multiplié par une puissance quelconque de 2 pour la tierce et ses octaves ; enfin, $^3/_2$, et ce nombre multiplié également par une puissance quelconque de 2 pour la quinte et ses octaves.

332. *Sons harmoniques.* Lorsqu'une corde est mise en vibration, et qu'elle produit un son grave et soutenu, une oreille attentive distingue facilement, outre le son fondamental, deux autres sons plus aigus, qui sont : l'octave de la quinte et la double octave de la tierce ; par exemple, si

le son fondamental est *ut*, on entend très-distinctement sol_2 et mi_3 (1): une oreille exercée distingue même encore l'octave de *ut*, ou ut_2 ; en représentant le son fondamental par 1, la tierce sera $^5/_4$, sa double octave sera 5 ; la quinte sera $^3/_2$, et son octave 3; enfin, l'octave du son fondamental sera 4. On distingue donc les sons 1, 2, 3, 4, 5. Il est infiniment probable que la corde rend tous les autres sons représentés par la suite de la série des nombres naturels 6, 7, 8, 9, 10, etc; mais que ces derniers ne sont point appréciés par nos organes, à cause de leur peu d'intensité. On ne peut expliquer la production des sons harmoniques, qu'en admettant que la corde se sous-divise d'elle-même en plusieurs parties qui vibrent simultanément, puisque la tension de la corde reste constante; il faut donc que la corde se divise en même temps en 2, 3, 4, 5, etc. parties égales, et que toutes les fractions égales et différentes vibrent en même temps sans se troubler ni se confondre. La possibilité de la coexistence de ces vibrations se conçoit aisément, d'après ce que nous avons dit sur la propagation des ondes sonores ; quant à la réalité de la sous-division de la corde en parties égales vibrant isolément, on peut la réaliser et la rendre sensible à l'œil par l'expérience suivante. Si on divise la corde vibrante A B (*fig.* 205) en deux parties inégales A C et C B par un chevalet mobile *m*, de manière que A C soit un multiple quelconque de C B, 3 fois plus grand par exemple, en promenant un archet sur C B, la corde A C se divise d'elle-même en 3 parties égales qui vibrent séparément (*fig.* 206). Pour rendre sensible cette division, il faut mettre sur la corde de petits chevalets de papier de différentes couleurs, les uns aux points de division de la corde, les autres dans les points intermédiaires ; aussitôt que la corde C B entre en vibration, ces derniers sont projetés à une assez grande distance, et les autres restent immobiles.

333. On peut encore produire la division d'une corde et les vibrations de ses parties, en faisant vibrer près d'elle une autre corde dont

---

(1) Désormais nous désignerons l'ordre de l'octave d'un son par un chiffre placé à la suite du nom et un peu en-dessous.

le son soit un de ses harmoniques. Les vibrations propagées par l'air ou par les corps intermédiaires se communiquent ; mais comme cette cause motrice est très-faible, il faut nécessairement que la corde puisse prendre un mouvement qui s'accorde périodiquement avec le retour des vibrations de l'air qui la frappe, afin que tous ces chocs successifs conspirent à produire le même effet : c'est ce qui arrive toutes les fois que la corde est un multiple ou un sous-multiple entier de la première, les deux cordes étant de même nature et également tendues, ou en général, lorsque le rapport des vitesses des vibrations est un nombre entier.

334. La simultanéité des sons occasionne souvent un phénomène très-remarquable, observé pour la première fois par le célèbre musicien Tartini. Ce phénomène consiste dans la production d'un nouveau son plus grave que chacun d'eux. Pour concevoir ce singulier phénomène, il faut se souvenir qu'un son est produit par une suite de battemens réguliers dont la rapidité détermine le degré d'acuité du son. D'après cette définition, il est facile de voir que toutes les fois que deux sons existeront ensemble, les deux séries de battemens qui en résulteront, coïncideront à de certaines époques aussi périodiques ; de sorte qu'il se formera une série de battemens doubles, qui se succéderont après des intervalles égaux, mais plus grands que ceux des battemens simples des deux séries primitives. La sensation produite par cette série de battemens doubles, sera un son continu, s'ils se succèdent avec assez de rapidité pour qu'il s'en forme plus de 32 par seconde ; dans le cas contraire, l'organe aura la sensation de chacun d'eux individuellement, et il ne se formera point de son continu. On peut facilement vérifier ce que nous venons de dire sur l'orgue et tous les instrumens dont on peut prolonger long-temps le son : en faisant résonner, par exemple, sol_3 et ut_2, on entend très-distinctement ut_1 ; mais si les deux sons simultanés sont trop graves ou trop rapprochés, la suite des battemens doubles produit un effet analogue au roulement d'un tambour. On peut facilement déterminer le son résultant de la coexistence des deux autres ; par exemple : si on fait résonner ensemble sol_3 et ut_2, le premier son étant représenté par 3 et le second par 2, il en résulte que le premier fera

3 battemens pendant que le second en fera 2; par conséquent, les 1[er], 3[e], 6[e], 9[e], etc. battemens du premier coïncideront avec les 1[er], 2[e], 4[e], 6[e], etc. battemens du second; par conséquent, les battemens doubles résultant de ces coïncidences seront 3 fois plus lents que ceux de *sol*₃, ou 2 fois plus que ceux de *ut*₂; par conséquent, le son résultant sera représenté par $^3/_3$ ou par $^2/_2$, ou par 1 qui est la valeur de *ut*₁.

335. *Tempérament.* Si nous imaginons un instrument à son fixe, tel qu'un piano ou une harpe, qui rende exactement tous les sons de la gamme ainsi que les dièses et les bémols intermédiaires, cet instrument donnera exactement toutes les octaves de chaque note; mais on ne pourra pas y trouver toutes les tierces et toutes les quintes justes; car il faudrait, pour obtenir les tierces justes, qu'en partant d'une note quelconque, et en multipliant le nombre de ses vibrations successivement par $^5/_4$, les nombres obtenus coïncidassent exactement avec les nombres de vibrations des sons de l'échelle harmonique, et pour y rencontrer toutes les quintes, il faudrait également qu'en multipliant le nombre des vibrations d'un son successivement par $^3/_2$, qui représente le rapport des vibrations de la quinte avec le son fondamental, on ne trouvât que des nombres déjà existans dans l'échelle harmonique: ce qui n'existe pas.

Pour obvier à cet inconvénient, on emploie différentes méthodes, qu'on désigne sous le nom de *Tempéramens.* La plus simple et la plus exacte consiste à diviser la gamme en 12 demi-tons moyens égaux, et à faire coïncider chaque son avec le semi-ton le plus voisin; par cette méthode, il n'y a qu'une seule note intercalaire: les dièses se confondent avec les bémols, mais l'erreur se trouvant à peu près également répartie sur toutes les notes, devient insensible pour l'oreille. Pour obtenir la valeur numérique de ce semi-ton moyen, il faut remarquer que le premier son étant 1, en le multipliant 12 fois de suite par la valeur du semi-ton cherché, on doit arriver à l'octave du son fondamental qui est 2; par conséquent, la valeur cherchée est égale à la racine 12[e] de 2, ou à 0,943874, on pourra alors déterminer facilement la longueur des cordes qui, sous la même tension, doivent rendre les séries de semi-tons moyens.

On emploie aussi un autre mode de tempérament dans lequel on fait porter les erreurs sur des intervalles qu'on emploie rarement.

Le tempérament n'est applicable qu'aux instrumens à sons fixes, tels que l'orgue, la harpe, le piano; car, les instrumens qui peuvent passer d'une manière continue d'un son à un autre, tels que le violon, la basse, la voix humaine, peuvent toujours rendre exactement un son quelconque : cependant ces instrumens sont obligés de tempérer lorsqu'ils jouent avec des instrumens à sons fixes, car autrement leur justesse produirait une discordance désagréable.

C. *Vibrations des Corps solides.*

336. *Procédés pour mettre les Corps solides en vibration sonore.* Pour qu'un corps solide soit mis en vibration sonore, il ne suffit pas de l'ébranler d'une manière quelconque; dans chaque cas particulier il y a un mode d'ébranlement plus favorable que tous les autres : en général, la condition à remplir est d'imprimer à une portion quelconque du corps une vive agitation; elle se communique bientôt à la masse et le son éclate.

Lorsqu'un corps est terminé par des bords minces, on peut le mettre en vibration en passant transversalement sur ses bords un archet enduit de colophane; c'est ce que l'on peut facilement vérifier sur des lames de bois, de métal ou de verre; pour ces dernières, il est nécessaire que les bords soient usés à l'émeri. On peut même exciter aussi les vibrations sur les corps vitreux en les frottant vivement avec un drap mouillé, ou avec le doigt; cette dernière méthode est mise en usage dans l'instrument appelé *Harmonica;* il est composé, comme on sait, d'une série de verres à pied que l'on fait résonner en promenant le doigt sur leur bord.

On peut aussi mettre les corps en vibration sonore, en fixant sur un point quelconque de leur surface, une tige solide ou une corde tendue que l'on met immédiatement en vibration, et qui communique son mouvement au corps avec lequel elle est en contact. C'est ainsi que l'on

peut mettre en vibration une coupe sur les bords de laquelle on a assujetti, d'une manière quelconque, une tige de verre ou de métal sur laquelle on promène un archet. C'est ainsi qu'une plaque solide, à travers laquelle passe une corde tendue, est mise en vibration par les mouvemens imprimés directement à la corde.

On peut, enfin, mettre les corps en mouvement en faisant vibrer à une petite distance d'autres corps qui ne sont en contact avec les premiers que par l'air ambiant : ce sont alors les vibrations de ce dernier qui communiquent le mouvement. Nous avons déjà vu que, pour les cordes tendues, il est nécessaire qu'il y ait un certain rapport entre les sons que peuvent rendre les deux cordes, autrement la communication n'aurait pas lieu : les mêmes conditions sont encore nécessaires pour tous les corps solides; mais les membranes flexibles et tendues paraissent recevoir le mouvement de tous les corps, quel que soit d'ailleurs le son moteur.

337. *Mouvemens produits par les vibrations des Corps solides.* Il paraît que les mouvemens vibratoires d'un corps solide peuvent se ranger en deux classes distinctes : les uns s'exécutent perpendiculairement à la surface des corps, et les mouvemens ont lieu suivant les normales ; les autres se manifestent parallélement aux plans tangens, et, par conséquent, perpendiculairement aux premiers. On peut facilement reconnaître l'existence de ces deux genres de vibrations en recouvrant la surface vibrante d'une poudre très-fine : lorsque les vibrations sont normales, la poussière est projetée verticalement, à une hauteur plus ou moins considérable, et lorsqu'elles sont tangentielles, la matière pulvérulente glisse sur la surface vibrante sans jamais la quitter : dans l'un et l'autre cas elle se réunit sur des lignes de repos, qu'on désigne sous le nom de *Lignes Nodales*, et dont nous parlerons bientôt.

Cette expérience, qui a conduit à la distinction des deux espèces de mouvemens vibratoires, ne démontre pas qu'il n'en existe pas qui soient inclinés à la normale et au plan tangent ; elle ne fait rien non plus préjuger sur ce qui se passe en-dessous de la surface. Cependant, comme la division des mouvemens vibratoires dont il s'agit facilite beaucoup l'intelligence des phénomènes, nous la conserverons.

338. *Vibrations des Verges élastiques droites.* Les verges élastiques droites, de verre, ou de métal, sont susceptibles d'éprouver, comme les cordes, trois espèces de vibrations : les vibrations longitudinales, transversales et spirales. On les met en vibrations longitudinales en les fixant par une de leurs extrémités, et passant un archet à l'extrémité libre ; on les met en vibrations transversales en les frottant vivement dans le sens de leur longueur ; enfin, on les met en vibrations spirales par des frictions circulaires et rampantes.

Lorsqu'une verge exécute des vibrations longitudinales, elle peut se sous-diviser comme les cordes en parties qui vibrent séparément ; il suffit pour cela de les toucher en un point, et si on emploie des verges plates, en répandant du sable sur leur surface, il se réunira dans les lignes de repos, et rendra ainsi sensibles à l'œil ces divisions spontanées. A mesure que la corde se sous-divise en un plus grand nombre de parties, le son devient plus aigu et l'acuité croît dans un plus grand rapport que dans les cordes. Pour les verges de même matière, qui ne diffèrent que par leurs longueurs et leurs épaisseurs, les nombres de vibrations, dans le même temps, sont proportionnels aux épaisseurs et en raison inverse des carrés de leurs longueurs : les largeurs n'ont point d'influence. Si les longueurs étaient égales, les vitesses des vibrations seraient seulement proportionnelles aux épaisseurs, de sorte que les lames les plus épaisses rendent les sons les plus aigus.

Les vibrations longitudinales s'obtiennent, comme nous avons dit, en frottant vivement dans le sens de la longueur et touchant avec le doigt un point quelconque : la verge se divise alors en parties aliquotes qui vibrent séparément (1). Les valeurs numériques des sons suivent exactement le rapport inverse des longueurs ; ainsi, le son le plus grave d'une verge qui vibre longitudinalement étant représenté par 1, les autres le seront par la suite 2, 3, 4, 5, etc. ; ils seront donnés successivement

(1) On a cru long-temps que ces vibrations avaient lieu entre les tranches extrêmement minces perpendiculaires à l'axe de la verge. Mais des expériences récentes de M. Savart prouvent que les tranches vibrantes sont obliques à la surface de la tige ; car les lignes nodales de la partie supérieure et inférieure d'une tige se trouvent 2 à 2 dans des plans parallèles, mais obliques à la surface.

à mesure que le nombre des nœuds augmentera d'une unité. Les sons produits par ce mode de vibration étant extrêmement aigus, il faut des tiges d'une grande longueur pour obtenir des sons appréciables.

Nous verrons bientôt que les phénomènes qui se développent dans une colonne d'air en vibrations, sont absolument analogues à ceux d'une verge en vibrations longitudinales : de la comparaison des sons produits, on a conclu la vitesse du son à travers la matière des verges solides. Ces résultats sont parfaitement d'accord avec ceux que M. Delaplace a déduits de la théorie.

339. *Vibrations des Verges courbes.* Lorsqu'une verge courbe est en vibrations sonores, le son rendu dépend non-seulement de la longueur et de l'épaisseur de la verge, mais encore de sa courbure. On n'emploie jamais dans les arts qu'une seule espèce de verge courbe, qu'on nomme *Diapason* ; il sert à régler le ton des instrumens de musique. Les deux branches A B et C D (*fig.* 207) sont convergentes, et, par conséquent, plus voisines vers leurs extrémités A et C que vers leurs bases; on introduit entre elles un cylindre métallique M qui peut entrer librement vers B D, mais qui ne peut sortir par A C qu'en écartant les verges qui alors se mettent en vibrations. On augmente l'intensité du son en appuyant l'instrument sur une caisse sonore. Comme le mode d'ébranlement de cet instrument est toujours le même, il en résulte qu'il rend toujours le même son, et, par conséquent, fournit un type invariable pour régler le ton des instrumens, en accordant avec lui la note qui forme son unisson. On fait des diapasons qui sont composés de 12 verges courbes, graduées de manière à rendre exactement les 12 demi-tons moyens dont se compose une octave dans le système de tempérament égal. Au moyen de cet instrument, on accorde les harpes et les pianos avec la plus grande facilité : on commence à mettre à l'unisson du diapason les sons qui y correspondent, et tous les autres se déduisent des premiers par des accords d'octave.

340. *Vibrations des Corps rigides de forme quelconque.* Lorsqu'un système de forme rigide quelconque est mis en vibrations, de manière à donner naissance à un son soutenu, le corps se partage en un certain

nombre de parties qui vibrent séparément. Les lignes de jonctions de ces différentes parties ne participent point au mouvement, et restent par conséquent immobiles : ces lignes portent le nom de *Nodales*. On peut facilement reconnaître leur existence et leurs formes pour les surfaces horizontales, en répandant sur ces surfaces du sable très-fin : les mouvemens tangentiels ou normaux le jettent sur les lignes nodales.

Les corps de forme quelconque, en se divisant ainsi en parties qui vibrent séparément, donnent naissance, indépendamment du son fondamental, à une série infinie de sons d'une intensité décroissante; mais ces sons n'ont point entre eux les mêmes rapports que dans les cordes, ils varient suivant la forme du corps. Il est probable, d'après M. Biot, que c'est la dégradation d'intensité de ces sons coexistans qui rend supportable leur ensemble, qui, s'ils avaient une égale intensité, produiraient d'horribles dissonances; et que c'est la nature des harmoniques rendus par les différens corps qui constitue le timbre.

On peut facilement constater les phénomènes que nous venons d'énoncer sur des plaques planes, homogènes, de verre ou de métal. On les soutient (*fig.* 208) au moyen d'un manche appliqué en un de leurs points avec de la cire d'Espagne, et on passe un archet sur leurs bords après avoir répandu de la poussière sur leur surface. Pour une plaque carrée de verre à vitre soutenue par son centre, en passant l'archet près d'un angle, on obtient le son le plus grave, et les lignes nodales (*fig.* 209) sont formées de deux lignes perpendiculaires-parallèles aux côtés, et passant par le centre. Si l'on fait passer l'archet sur le milieu d'un côté et que l'on applique le doigt sur un angle, le son sera plus aigu et les lignes nodales seront deux diagonales (*fig.* 210). En faisant varier la forme de la plaque, le point d'application du support et la position de l'archet, on pourra faire varier à l'infini et le son rendu et la forme des lignes nodales.

D. *Vibrations des colonnes d'air dans les Instrumens à vent.*

341. Dans tous les instrumens à vent, c'est uniquement la colonne

d'air renfermée dans les parois solides qui entre en vibrations : c'est ce que l'on peut facilement démontrer dans l'orgue, en substituant à un tuyau, un autre de même forme, mais de toute autre substance : le son produit reste toujours le même, sous le rapport de l'acuité. Ainsi, qu'un tuyau soit en bois, en métal, en carton, peu importe ; si la forme ne change pas, dans les mêmes circonstances il produira toujours le même son : le timbre seul variera. Cette dernière qualité du son dépend probablement, comme nous l'avons déjà dit, d'une faible vibration de l'enveloppe.

342. *Mode d'ébranlement.* Pour produire des vibrations sonores dans une colonne d'air, il suffit d'exciter en un point quelconque une succession rapide de condensations et de dilatations alternatives : ces mouvemens se transmettent de proche en proche comme dans la propagation du son. On emploie dans les instrumens à vent deux modes différens d'ébranlement : le premier consiste à faire arriver à l'extrémité de l'instrument une lame d'air très-rapide contre un obstacle taillé en biseau aigu ; c'est ainsi que l'on fait résonner une clef forée, un sifflet, une flûte : le second mode d'ébranlement consiste à faire arriver une lame d'air dans un canal étroit dont une des parois est mince et élastique ; cette paroi se met en vibrations, qui se propagent ensuite dans la colonne d'air ; cet appareil porte le nom d'*Anche;* c'est ainsi que l'on met en vibrations sonores, la clarinette, le basson, le cor, etc. ; dans ce dernier, ce sont les lèvres qui sont mises immédiatement en vibrations et qui servent d'anche. Les vibrations imprimées à la colonne d'air par ces différens modes d'ébranlement, doivent agir sur les premières lames d'air suivant des lois très-compliquées ; mais cette complication ne s'étend qu'à une très-petite distance de l'orifice : au delà les mouvemens deviennent réguliers et uniformes.

343. *Vibrations dans un Tuyau cylindrique fermé par un bout et ouvert par l'autre.* Soit AB (*fig.* 211) un tuyau cylindrique fermé en B et ouvert en A. Supposons que la lame d'air infiniment mince AA entre et sorte alternativement, avec des vitesses égales, pour produire dans la couche d'air, qui est en contact avec elles, les alternatives régulières de

condensations et de dilatations nécessaires à la production du son. Ces mouvemens alternatifs de la lame d'air A A donneront naissance à une série d'ondes sonores d'une longueur constante a, alternativement condensantes et raréfiantes, qui se propageront avec une vitesse uniforme vers le fond du tuyau sur lequel elles se réfléchiront, et reviendront sur elles-mêmes avec la même vitesse (1). Considérons la série des ondes sonores lorsque le milieu de l'une d'elles est en contact avec le fond du tuyau : le commencement et la fin de l'onde C''' C'' dont le milieu s'appuye sur B B, coïncident, et il en est de même de toutes les extrémités des ondes incidentes et réfléchies. Ces coïncidences ont lieu, savoir : D'' à une distance $\frac{a}{2}$ du fond du tuyau, les autres sont distantes de la quantité a : à l'instant que nous considérons, les couches d'air D', D'', D''', D'', n'éprouvent ni dilatation ni condensation, car les extrémités des ondes condensantes ou raréfiantes ne sont ni dilatées ni raréfiées ; mais les lames d'air situées sur le fond B B, et au milieu des intervalles de coïncidences, éprouvent une double condensation ou une double dilatation, à cause de la superposition des ondes incidentes et réfléchies qui sont de même nature à la même distance du fond du tuyau. Examinons maintenant ce qui arrivera lorsque les ondes continueront leur mouvement de translation : par la section D'', il passera toujours deux ondes, l'une directe et l'autre réfléchie, et toujours de nature contraire, c'est-à-dire, si l'une est condensante, l'autre sera raréfiante, et réciproquement ; et comme les parties de ces ondes qui passent simultanément à travers cette section sont à la même distance de leur origine, il en résulte que les forces raréfiantes et dilatantes sont égales, et, par conséquent, qu'elles se détruisent exactement : il est facile de voir que la même chose aura lieu pour les autres sections D''', D'', D', D ; mais par toutes les sections intermédiaires, il passe toujours deux ondes incidentes et réfléchies de même nature, dont les effets s'ajoutent ; ainsi les tranches D, D', D'', D''', D'' sont les seules qui restent dans un état uniforme de

(1) La longueur a de chaque onde, est égale à l'espace parcouru par le son pendant la durée d'une excursion de la lame mobile A A.

densité, et les condensations et les dilatations ne se manifestent que dans les tranches intermédiaires. Indépendamment des dilatations et des condensations, il se produit encore des déplacemens qu'il est important d'examiner; sur le fond du tuyau et au milieu des intervalles D'' D''', D''' D'', etc., les vitesses de translation des ondes directes et réfléchies sont égales et contraires, par conséquent elles se détruisent, et ces sections qui éprouvent successivement toutes les périodes de dilatation et de condensation restent immobiles; mais il n'en est pas de même des sections D'', D''', etc.; elles sont toujours de nature contraire, et comme leurs vitesses de translations ont lieu dans des sens opposés, leurs effets s'ajoutent; de sorte que ces tranches qui restent dans un état permanent de densité, éprouvent des mouvemens périodiques et oscillatoires de translation. En résumant ce qui précède, la colonne aérienne A B se divise à partir du fond B en parties égales aux points N''', N'', N', N, qui vibrent séparément : les extrémités de ces tranches vibrantes sont fixes; les condensations et les dilatations décroissent depuis les extrémités où elles sont à leur maximum jusqu'au milieu où elles sont nulles, et les mouvemens de translation décroissent au contraire depuis les milieux où elles sont à leur maximum jusqu'aux extrémités où elles sont nulles; le fond du tuyau est toujours un nœud de vibrations, et l'extrémité ouverte est le milieu d'une tranche vibrante; la dernière lame d'air entre et sort alternativement sans éprouver aucune variation de densité, et propage dans l'air environnant des ondes sonores qui ont la même longueur que celles qui se forment dans le tuyau.

Connaissant le nombre des nœuds de vibrations, il est très-facile de déterminer le rapport des sons qui se produisent. En effet, supposons qu'il ne se forme qu'un seul nœud de vibrations, il aura lieu sur le fond; et comme l'extrémité libre doit être au milieu d'une tranche vibrante, la longueur du tuyau, que nous représenterons par l, doit être égale à la moitié d'une onde : la longueur de l'onde est donc de $2l$. S'il se formait 2 nœuds de vibrations (*fig.* 213), B M serait égal à la longueur d'une onde, et M A à la moitié, par conséquent la longueur d'une onde est égale à $\frac{2l}{3}$. S'il se formait 3 nœuds de vibrations (*fig.* 214),

on trouverait de même que la longueur des ondes serait $\frac{2l}{5}$, et pour 4, 5, 6, etc., les ondes sonores auraient des longueurs représentées par $\frac{2l}{7}$, $\frac{2l}{9}$, $\frac{2l}{11}$, etc. Or, les vitesses des battemens sont en raison inverse des longueurs des ondes, par conséquent, les sons résultans seront entre eux comme la suite des nombres impairs, 1, 3, 5, 7, 9, etc. Si, par exemple, le son le plus grave, celui qui correspond à un seul nœud de vibration était *ut*, le tuyau ne pourrait rendre que les sons sol_2, mi_3, $la_3^{\sharp}$ + (1), $ré_4$, $fa_4^{\sharp}$ —, $la_4^{\flat}$ +, si_4, etc., qui correspondent à la série des nombres impairs.

On pourrait aussi déterminer d'avance le son que doit rendre un tuyau bouché par un bout, lorsqu'on connaît sa longueur et le nombre des nœuds de vibrations; en effet, le son parcourt 1024 pieds par seconde, et une onde ne devient sonore que quand il en passe 32 par seconde; par conséquent, on aura la longueur de l'onde sonore, qui produira le son le plus grave en divisant 1024 par 32: ce qui donne pour quotient 32. Cela posé, connaissant, d'après ce qui précède, la longueur absolue de l'onde sonore, en divisant 32 par ce nombre, le quotient sera le nombre qui représentera le son dans l'échelle harmonique : par exemple, si le tuyau a 16 pieds et qu'il se forme 2 nœuds de vibrations, la longueur de l'onde sera $\frac{2l}{3}$ ou $\frac{32}{3}$, le quotient de 32 par ce nombre sera 3; par conséquent, le son rendu sera sol_2.

344. *Vibrations des colonnes d'air dans les tuyaux ouverts par les deux bouts.* Nous avons vu que dans un tuyau fermé par un bout la colonne fluide vibrante se divisait en tranches d'égales longueurs qui vibraient isolément, et que les milieux de ces tranches n'éprouvaient aucune variation de densité, mais seulement un mouvement oscillatoire; il résulte de là, que si l'on pratiquait le long du tuyau des ouvertures correspondantes à ces milieux des tranches vibrantes, rien ne serait changé, et le son rendu resterait le même; et cela aurait encore lieu, quelle

---

(1) Les signes + et — mis à la suite indiquent que le son est un peu plus ou un peu moins élevé que la note.

que fût l'étendue transversale de l'ouverture ; de sorte que si le tuyau se trouvait séparé par le milieu de la tranche vibrante la plus voisine du fond du tuyau, le mode de vibration ne serait point altéré : mais alors le tuyau serait ouvert par les deux bouts; par conséquent, les mouvemens qui se manifestent dans la portion CA du tuyau bouché (*fig.* 214), sont absolument les mêmes que ceux qui se développeront dans un tuyau ouvert par les deux bouts. Ainsi dans un tuyau ouvert par les deux bouts, la colonne d'air vibrante se divise en parties égales vibrant séparément ; les extrémités du tuyau sont deux milieux de tranches vibrantes, par conséquent l'air n'y éprouvera aucune variation de densité, il aura seulement un mouvement alternatif qui fera successivement entrer et sortir la dernière lame d'air par l'élasticité de l'air extérieur.

Il est très-facile de déterminer, comme pour les tuyaux fermés par un bout, le rapport des sons rendus par un même tuyau suivant le nombre des nœuds de vibrations : en effet, s'il n'y a qu'un seul nœud, il sera au milieu du tuyau, il y aura de chaque côté deux demi-ondes sonores; par conséquent, en représentant la longueur du tuyau par l, la longueur de l'onde sonore sera l: s'il y avait deux nœuds de vibrations, il y aurait entre eux une onde complète et une demi de chaque côté ; par conséquent la longueur d'une seule onde serait $\frac{l}{2}$; on trouverait de même que pour 3, 4, 5, etc. nœuds, la longueur de l'onde serait $\frac{l}{3}$, $\frac{l}{4}$, $\frac{l}{5}$, etc. ; par conséquent, les longueurs des ondes seraient entre elles comme les nombres 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, etc., et les vitesses des vibrations sonores comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, 6, etc. ; de sorte que si le son le plus grave était *ut*, les sons rendus par le même tuyau seraient *ut*, ut_2, sol_2, ut_3, mi_3, sol_1, $\overset{\sharp}{la_3}$ +, ut_4, etc.

On pourrait aussi, comme dans les tuyaux fermés par un bout, déduire de la longueur absolue du tuyau et du nombre des nœuds, le son absolu qu'il doit rendre.

Dans les deux espèces de tuyaux dont nous venons de parler, plusieurs vibrations différentes peuvent exister en même temps comme dans les vibrations transversales des cordes ; c'est pourquoi on distingue souvent

dans la résonnance d'un tuyau plusieurs sons plus aigus que le son fondamental.

Tous les résultats que nous venons d'énoncer sont confirmés par l'expérience ; cependant, les sons rendus par les tuyaux cylindriques sont toujours un peu plus graves que ceux indiqués par la théorie : cet effet provient de ce que la première tranche vibrante, celle qui est la plus voisine de l'embouchure, est toujours un peu plus courte que les autres, à cause du mode d'embouchure qui n'ébranle jamais que partiellement cette première tranche. M. Poisson a découvert que le son de cette première tranche vibrante pouvait s'abaisser indéfiniment par des modes d'ébranlement convenables, et cette observation théorique a été constatée par les expériences de M. Chanteau qui, en augmentant le diamètre du cylindre, diminuant celui de l'ouverture, et variant la direction de la lame d'air, est parvenu a obtenir des sons d'une gravité extrême.

345. *Tuyaux de diamètre inégal.* Dans les tuyaux de diamètre inégal fermés par un bout ou ouverts par tous les deux, la colonne d'air se divise encore en parties qui vibrent séparément ; mais ces parties ne sont plus égales, leur longueur dépend de la forme du tuyau.

346. *Explication des différens Instrumens à vent.* Tous les instrumens à vent sont des tuyaux ouverts par les deux bouts ou fermés par un seul. Lorsque la longueur du tuyau est constante, les sons voisins du son fondamental sont très-éloignés les uns des autres ; mais ils se rapprochent davantage à mesure qu'ils sont plus élevés, et c'est seulement dans les tons très-élevés que l'on peut trouver les notes consécutives de la gamme, ainsi que les sons intermédiaires ; c'est ce qui arrive pour la trompette : mais pour tous les autres, on obtient les sons consécutifs, à partir du son le plus grave, 1° en allongeant ou en raccourcissant directement le tuyau, comme dans le trombone ; 2° en produisant le même effet au moyen de trous latéraux, comme dans la flûte, la clarinette, etc.; 3° en modifiant l'ouverture du tuyau avec la main, comme dans le cor.

347. *Syrène.* Cet instrument, imaginé récemment par M. Cagniard-Latour, est composé (*fig.* 215) d'un tuyau A, amenant un courant

d'air au-dessous d'un plateau circulaire B, mobile autour de son centre, et percé vers sa circonférence d'un grand nombre de trous obliques équidistans: le courant d'air, en frappant ces ouvertures obliques, les fait tourner comme un volant. La rotation du plateau, présentant successivement à l'extrémité du tuyau A des intervalles pleins et vides, il en résulte que l'air extérieur éprouve des pulsations successives d'autant plus voisines, que le plateau se meut avec une plus grande rapidité; par conséquent, si le plateau se meut avec une vitesse suffisante pour que dans une seconde il passe plus de 32 ouvertures devant l'extrémité du tuyau, il en résultera un son qui sera d'autant plus aigu que le plateau tournera avec plus de rapidité: c'est ce que l'expérience a parfaitement confirmé. M. Cagniard a cherché à vérifier, par cet instrument, les nombres de vibrations correspondantes aux différens sons de la gamme, nombres qui ont été déduits des vibrations des cordes: pour cela, il a fait tourner le plateau par une machine qui indiquait le nombre des révolutions dans une seconde; connaissant le nombre des ouvertures du plateau, il en a déduit le nombre des battemens qui avaient lieu dans une seconde, et après avoir calculé le son qui devait être produit par la théorie que nous avons exposée, il a fait arriver un courant d'air par le tuyau. Le son rendu, dont on a cherché l'unisson sur un instrument à son fixe, a été exactement celui que la théorie avait indiqué.

E. *Communication des mouvemens vibratoires.*

348. Lorsqu'un corps est mis en vibration, les ondes sonores, par leurs chocs réitérés, peuvent mettre en vibration tous les corps qui jouissent de la propriété de produire un de ses sons harmoniques. Nous en avons donné l'explication (333); mais les mouvemens vibratoires peuvent aussi se communiquer par le contact immédiat ou par l'intermédiaire de tout corps élastique. C'est ce que M. Savart a vérifié par un grand nombre d'expériences fort ingénieuses, faites principalement sur le verre et les lames minces de bois sec dont on se sert pour faire les caisses des instru-

mens à corde; c'est ce qui est d'ailleurs constaté par une infinité de phénomènes qui se passent tous les jours sous nos yeux : le son d'un diapason est faible, lorsqu'il est isolé; mais si on le fait toucher une caisse de piano, il devient à l'instant d'une force extraordinaire : le son d'une corde isolée tendue sur un corps dépourvu d'élasticité, est maigre et désagréable; mais si elle est tendue sur un corps sonore, tel que la caisse d'un violon, d'une basse, d'une harpe, d'un piano, auquel elle communique ses vibrations, il prend une rondeur et un éclat que la corde seule n'aurait jamais pu lui donner.

349. Les corps élastiques qui sont mis en mouvement par leur contact avec des corps vibrans, se divisent en différentes parties qui vibrent séparément, et rendent des sons en harmonie avec celui du corps que l'on fait vibrer directement. Cependant, d'après les observations de M. Savart, le son qui résulte des vibrations de plusieurs corps en contact avec un seul sur lequel on agit directement, ne rend pas exactement le même son qui résulterait du même mode de vibration de chacun d'eux isolément; les vibrations coexistantes de toutes les parties du système se modifient réciproquement.

On conçoit facilement, d'après ce qui précède, le rôle que joue la caisse des instrumens à corde : destinée à partager tous les modes de vibrations des cordes, elle doit s'y prêter facilement; par conséquent, elle doit être de bois mince, sec, sonore; la fibre en doit être homogène, dépourvue de nœuds, et les différentes parties doivent être liées par le moins de masses possible.

350. Il résulte de tout ce qui précède que l'intensité des sons rendus par un corps quelconque mis en vibration est augmentée, 1° par les vibrations des corps avec lesquels il est en contact; 2° par les vibrations des corps éloignés qui peuvent rendre un de ses harmoniques, vibrations qui sont excitées par les chocs réitérés des ondes sonores; 3° par les échos voisins, qui ne laissent entre le départ et le retour des ondes qu'un intervalle plus petit que celui de la durée de l'émission du son. Il suit de là, que pour qu'une salle soit très-sonore, il faut que le lieu d'où part le son soit le plus isolé possible de la masse de l'édi-

fice, que l'orchestre soit porté sur une caisse sonore (1), que les parois de la salle soient unies, dépourvues de ces cavités où les ondes sonores vont s'engouffrer et ne peuvent plus se distribuer au reste des auditeurs, et surtout de draperies, qui n'étant pas douées d'élasticité, anéantissent les ondes sonores qui viennent les rencontrer.

F. *Organes de l'Ouïe et de la Voix.*

351. *Organe de l'Ouïe.* Chez l'homme, l'organe destiné à recevoir l'impression des sons, est composé d'un appareil extérieur, nommé Pavillon, formé d'une membrane épaisse qui paraît destinée à concentrer les ondes sonores vers un canal cylindrique qui s'enfonce dans la tête; ce canal, désigné sous le nom de Conduit Auditif, est garni intérieurement de poils et d'une matière visqueuse qui en défendent l'accès aux corps étrangers; une membrane mince, sèche et tendue, la membrane du tympan, ferme le canal auditif, et sépare la partie intérieure de la partie extérieure de l'appareil; derrière cette membrane se trouve une cavité, que l'on nomme Caisse du Tympan, qui communique avec le gosier par un canal; contre les parois de la caisse du tympan il existe deux ouvertures fermées par des membranes minces; l'une est désignée sous le nom de Fenêtre Ovale, l'autre sous celui de Fenêtre Ronde; une chaîne formée par quatre petits osselets est fixée par ses extrémités à la membrane du tympan et à la membrane de la fenêtre ovale; derrière la membrane de la fenêtre ovale s'ouvre un canal osseux contourné en spirale, et que l'on appelle Limaçon; il communique avec une cavité plus grande, appelée Vestibule, qui vient aboutir derrière la membrane de la fenêtre ronde; dans le vestibule aboutissent trois canaux semi-circulaires. L'ensemble du limaçon, du vestibule et des canaux, porte le nom de Labyrinthe;

---

(1) Cette condition est remplie dans la plupart des théâtres d'Italie. Les anciens, dans leurs immenses amphithéâtres, qui étaient entièrement découverts, augmentaient l'intensité de la voix des acteurs par des vases d'airain, dont Vitruve indique la position. Nous ne concevons pas comment ils pouvaient produire cet effet.

le labyrinthe est tapissé intérieurement d'une membrane très-mince, et rempli d'un liquide dans lequel vient s'épanouir le nerf acoustique.

Telle est la description succincte de l'appareil de l'audition : il paraît d'une complication extrême ; nous ignorons l'usage d'une grande partie des objets qu'il renferme : c'est de tous nos organes celui qui est le moins connu dans ses fonctions. Nous allons cependant énoncer le peu que nous avons appris sur le rôle que jouent, dans la perception des sons, les différentes parties de cet admirable appareil.

Le pavillon, évasé extérieurement comme un cornet acoustique, sert évidemment à recueillir et à concentrer les ondes sonores ; les quadrupèdes, dans lesquels cette membrane est mobile, dirigent l'ouverture du pavillon du côté d'où vient le son qu'ils veulent percevoir ; l'animal qui fuit, le dirige derrière ; l'animal qui en poursuit un autre, le dirige en avant. D'après les observations de M. Savart, les membranes élastiques ayant la propriété d'être ébranlées par tous les sons, il est probable que le pavillon est mis en mouvement par le choc des ondes sonores, et que ces vibrations, transmises par les corps solides qui sont en contact avec lui, concourent à produire la sensation. Cependant cette partie de l'organe n'est point indispensable à l'audition, car beaucoup d'animaux ont l'organe de l'ouïe dépouillé de tout appendice extérieur, tels sont les oiseaux, les reptiles, etc. La membrane du tympan paraît destinée à recevoir et à communiquer, par la chaîne des osselets, les vibrations des ondes sonores ; mais cette membrane ne paraît point encore indispensable à l'audition, car des individus chez qui elle avait été déchirée et même détruite par un accident, n'avaient pas éprouvé une altération sensible dans la faculté de percevoir les sons ; cependant la chaîne des osselets était tombée, et n'était plus appliquée que contre la membrane de la fenêtre ovale. La chaîne des osselets a probablement pour fonction, non-seulement de transmettre les vibrations du tympan, mais encore de modifier la tension de cette membrane, afin d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de ses vibrations. Le conduit guttural paraît destiné à renouveler l'air de la caisse du tympan : cette partie de l'appareil doit être d'une nécessité absolue, car lorsqu'il vient à se bou-

cher, la surdité s'ensuit toujours. Quant au labyrinthe, il paraît que les membranes qui ferment la fenêtre ovale sont destinées à entrer en vibration, ou par la chaîne des osselets, ou par le choc des vibrations de l'air de la caisse du tympan, et que ces vibrations, propagées par le liquide renfermé dans le labyrinthe, se communiquent au nerf acoustique, qui les transmet au cerveau où se fait la sensation. La présence du liquide, des membranes et du nerf acoustique est absolument indispensable pour l'audition.

En examinant l'organe de l'ouïe chez les autres animaux, on a remarqué qu'en descendant l'échelle de l'organisation, l'appareil va toujours en se simplifiant, et finit chez les crustacés par n'être plus qu'une cavité cylindrique, pleine d'un liquide visqueux dans lequel viennent s'épanouir les dernières ramifications du nerf acoustique; cette cavité écailleuse est terminée par une membrane mince que l'air frappe directement: c'est en cela seul que consiste l'ouïe réduite à son plus grand degré de simplicité. La complication que cet appareil éprouve dans les animaux plus organisés, semble avoir pour objet de le soustraire à l'action des causes étrangères; mais il est infiniment probable que cette complication n'a pas ce but unique, et qu'à mesure que les parties de l'appareil deviennent plus nombreuses, l'organe acquiert la faculté de percevoir de nouvelles qualités du son.

352. *De la Voix.* La voix est un instrument à vent, absolument semblable à un appareil que l'on emploie dans les orgues, et qui est connu sous le nom de Tuyau à Anche Libre. Nous allons commencer par décrire cet appareil.

L'appareil en question est composé (*fig.* 216) d'un tuyau cylindrique B, terminé inférieurement par un tuyau conique A ouvert, et supérieurement par un autre tuyau évasé C; dans ce dernier entre à frottement dur un cylindre D ouvert par les 2 bouts, et dont l'extrémité inférieure est formée comme une anche de clarinette; E est une lame élastique, F une portion fixe du cylindre; la lame élastique E, que l'on désigne sous le nom de Languette, dans sa position naturelle laisse le tuyau en partie ouvert; G H est une tige de fer, au moyen de laquelle on laisse libre une partie plus ou moins considérable de la languette. Lorsque

l'on introduit un courant d'air par l'ouverture *o*, ou en soufflant avec la bouche ou au moyen d'un soufflet, le courant d'air qui s'introduit dans le tuyau B fait baisser la languette, et il sort une certaine quantité d'air; bientôt la réaction de l'air extérieur et l'élasticité de la languette la ramènent à sa position initiale qu'elle dépasse, pour y revenir encore et faire ainsi des oscillations, dont la rapidité dépend de la longueur de la partie libre de la languette; le timbre, de la forme du tuyau C; et l'intensité du son, de la vitesse du courant d'air. Le courant d'air, en changeant de vitesse, modifie cependant un peu le ton; mais pour faire disparaître ces variations, M. Grenié a imaginé de placer dans le tuyau C des lamelles de papier fixées par leurs bases, et qui, s'élevant ou s'abaissant à mesure que le courant d'air devient plus ou moins rapide, modifient tellement les ondulations, que le ton reste le même avec une intensité proportionnelle à la vitesse du vent. On conçoit maintenant que cet instrument, en y faisant varier la longueur de la languette au moyen de la tringle G H et la vitesse du courant d'air, peut donner tous les sons possibles avec tous les degrés d'intensité.

L'appareil vocal se compose chez l'homme : 1° des poumons, dont les cavités renferment de l'air, que des muscles puissans expulsent à chaque expiration; 2° d'un canal cylindrique placé à l'extrémité supérieure des poumons, et qui sert de conduit à l'air qui en est chassé; 3° d'un appareil désigné sous le nom de Glotte, qui est placé à l'extrémité de la trachée-artère : cet appareil se compose de 2 lames rectangulaires contractiles et élastiques, fixées par leurs bases contre les parois du canal qui sort des poumons, et qui, à la hauteur de la glotte, porte le nom de Larynx; 4° d'une membrane plane élastique qui, fixée par sa base contre les parois de la trachée-artère, peut prendre dans ce canal toutes les inclinaisons possibles; 5° enfin, la dernière partie de l'organe vocal se compose du gosier, de la bouche et des fosses nasales.

M. Magendie, en observant la glotte des chiens pendant l'émission du son, a remarqué que les lèvres de la glotte vibraient dans toute leur étendue libre, et que cette partie libre des lèvres de la glotte variait avec la gravité du son rendu; qu'elle était très-longue pour les sons

graves, et qu'à mesure que les sons devenaient plus aigus, les deux lèvres se serraient l'une contre l'autre sur une partie plus ou moins considérable de leur longueur, de manière à diminuer de plus en plus la partie vibrante.

On voit, d'après cela, l'identité parfaite qui existe entre l'organe de la voix et l'instrument que nous avons décrit : les poumons servent de soufflet, la trachée de porte-vent, la glotte d'anche, l'épiglotte des lames mobiles, la bouche et les fosses nasales de tuyau pour l'écoulement de l'air. L'appareil vocal, comme l'instrument à anche libre, peut produire une grande variété de sons différens et sous le rapport de l'acuité et sous celui de l'intensité, par les variations de vitesses du courant d'air, les variations de longueur de la partie libre des lèvres de la glotte, et par l'abaissement plus ou moins considérable de l'épiglotte.

L'étendue des voix humaines embrasse à peu près 3 octaves. Les voix des femmes et des enfans sont beaucoup plus hautes que celles des hommes faits, parce que dans ces derniers les lèvres de la glotte sont beaucoup plus grandes. La voix des enfans change vers l'âge de la puberté; elle devient beaucoup plus grave. On a observé aussi qu'à cette époque les lames de la glotte s'allongent presque du double.

Le gosier, la bouche et les fosses nasales forment le tuyau d'écoulement de l'air; la disposition de ces ouvertures a une grande influence sur le timbre : si les fosses nasales viennent à s'obstruer de manière que l'air ne puisse plus y passer, la voix prend un timbre particulier, et l'on dit que l'on parle du nez; expression vicieuse, car c'est alors seulement que l'on ne parle pas du nez. Pour vérifier cette assertion, il suffit de comprimer les narines avec les doigts, de manière à les fermer : la voix prend à l'instant le timbre en question.

L'organe de la voix chez les autres animaux est disposé de la même manière que dans l'homme, aussi il n'y a que les animaux pourvus de poumons qui aient une véritable voix. La seule différence qu'on rencontre, c'est la position de la glotte; dans les oiseaux, elle est placée à la partie inférieure de la trachée-artère, presque à l'issue des poumons; c'est pourquoi, les oiseaux criards à qui on a coupé le cou, même très-loin de la tête, continuent à crier.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE V.

Corps Gazeux.

Constitution des Corps Gazeux et Phénomènes qui en résultent.

Les corps gazeux sont des corps dans lesquels la distance des molécules est plus grande que la distance d'affinité sensible, et la force répulsive de la chaleur plus grande que leur attraction. On désigne sous le nom de Gaz, proprement dit, ceux qui conservent leur état, quelles que soient la pression et la température auxquelles on les soumette; et par vapeurs, les gaz qui repassent facilement à l'état liquide par la compression ou un abaissement de température (1).

Les corps gazeux sont pesans, tendent continuellement à se dilater: ils sont élastiques et communiquent la pression dans tous les sens. C'est ce qu'il faut vérifier d'abord sur l'air atmosphérique.

AIR ATMOSPHÉRIQUE.	*Pesanteur.* On reconnaît que l'air est pesant, en pesant successivement un ballon vide et plein d'air. *Compressibilité, Élasticité.* On reconnaît facilement ces propriétés dans l'air renfermé dans une vessie. *Communication de la pression dans tous les sens.* Cette propriété résulte de ce que l'air, chassé d'un vase par une pression quelconque, s'échappe perpendiculairement à toutes les ouvertures, quelle que soit d'ailleurs leur direction. *Disposition de l'atmosphère.* L'atmosphère environne la terre de toute part; il est limité: sa densité décroît dans chaque couche, à partir de la surface de la terre; il communique dans tous les sens la pression qui résulte de son poids.
PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES GAZ.	*Procédés pour les recueillir.* On peut recueillir les gaz, 1° dans des vases à parois mobiles, dont on expulse l'air par le rapprochement des parois; 2° dans des vases à parois solides, dont on expulse l'air, ou par un courant de gaz, ou en les remplissant d'un liquide et les renversant dans un bain du même liquide, et faisant arriver le gaz à travers le liquide sous l'orifice du vase. *Propriétés des corps gazeux.* Les corps gazeux jouissent des mêmes propriétés que l'air atmosphérique; on les constate par les mêmes expériences.
DÉTERMINATION DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ.	*Pression de l'atmosphère.* Lorsqu'un tube, fermé par une extrémité et ouvert par l'autre, a été rempli par un liquide quelconque et renversé dans un bain d'un même liquide, le fluide se maintient dans le tube, par la pression de l'air sur la surface libre du bain à des hauteurs qui sont en raison inverse de la densité du liquide; le mercure se tient à 0,76 ou 28 pouces; l'eau à 32 pieds, etc. Cet appareil porte le nom de Baromètre. Pour que les indications d'un baromètre soient exactes, il faut que le mercure soit exempt de tout métal étranger qui lui donnerait de la viscosité, et qu'il soit ainsi que le tube purgé d'air et d'humidité. On remplit ces conditions en

(1) Cette distinction des gaz et des vapeurs n'est point rigoureusement exacte, car il est très-probable que tous les gaz pourraient être liquéfiés par de grandes pressions ou des abaissemens suffisans de température, puisque l'on est déjà parvenu à liquéfier ainsi un grand nombre de gaz en les soumettant, à leur naissance, à une grande pression, mais comme cette liquéfaction n'a pas encore pu être produite en soumettant ces gaz tout formés à de grandes pressions ou à de très-basses températures, nous nous sommes cru autorisé à conserver encore la distinction des gaz et des vapeurs.

Détermination de la force élastique des gaz.

employant du mercure distillé, et en faisant bouillir le mercure dans le tube. Un baromètre, dans son usage, présente plusieurs causes d'erreurs : 1° les variations de niveau du métal de la cuvette; 2° la capillarite; 3° les variations de poids du mercure par les changemens de température. On diminue la première cause d'erreur, en donnent à la cuvette une grande surface, par rapport à celle du tube. Elle n'existe pas dans le baromètre de Fortin, attendu qu'avant chaque observation on place le niveau de la cuvette à une hauteur constante; elle n'existe point non plus dans le baromètre de Gay-Lussac, parce qu'à chaque opération on mesure la hauteur du niveau de la cuvette au-dessus d'un point fixe. La seconde cause d'erreur n'existe pas dans le baromètre de Gay-Lussac, ou la capillarite du tube est détruite par celle de la cuvette; dans toutes les autres on tient compte de la dépression du mercure occasionnée par la capillarite, en connaissant le diamètre intérieur du tube. Quant à la cause d'erreur provenant des variations de température, aucune disposition ne peut la faire disparaître, et pour rendre les mesures comparables, on réduit par une formule les hauteurs barométriques à ce qu'elles auraient été si elles eussent été faites à la même température. Le baromètre est employé pour prévoir les changemens qui surviennent dans l'atmosphère, parce que ces changemens font varier la pression; pour mesurer la hauteur des montagnes, parce que la colonne barométrique s'abaisse d'autant plus que l'on s'élève davantage au-dessus du niveau de la mer.

Mesure de la force élastique d'un gaz renfermé dans un espace clos. Lorsque le vase est fermé de toute part, on ne peut mesurer la pression du gaz qu'il renferme qu'en y introduisant un baromètre; lorsque le gaz est renfermé dans une cloche reposant sur un liquide, il est soumis à la pression de l'atmosphère, moins le poids d'une colonne liquide égale à la différence de niveau, si le liquide est plus haut dans la cloche que dans le réservoir, et plus s'il est plus bas.

Rapport du volume à la force élastique des gaz.

Le rapport en question a été déterminé par M. Mariote, au moyen d'un siphon renversé, à branches parallèles, dont une est fermée et l'autre ouverte; le gaz introduit dans la branche fermée était comprimé par du mercure accumulé dans la branche ouverte; il a trouvé que les forces élastiques des gaz étaient en raison inverse des volumes, ou en raison directe des densités.

Détermination de la densité des gaz.

L'unité de densité est l'air atmosphérique sous la pression de 0,76 et à la température de la glace fondante; on détermine la densité des gaz en pesant successivement un ballon à robinet vide plein d'air, et du gaz dont on veut déterminer la densité; lorsque la pression et la température ne sont pas exactement 0,76 et zéro, il faut ramener les poids observés à ce qu'ils auraient été dans ces circonstances.

Corps flottans dans les Gaz.

Lorsqu'un corps est plongé dans un gaz, il tend à descendre avec son propre poids, et il est poussé en sens contraire par le poids du gaz dont il tient la place; ainsi, suivant que ce dernier poids sera plus grand, égal, ou plus petit que le premier, le corps montera, restera stationnaire, ou tombera. Les aérostats sont des enveloppes à peu près sphériques, en papier ou en taffetas vernis, gonflés avec de l'air dilaté ou du gaz hydrogène. La force ascensionnelle est égale au poids de l'air déplacé, moins le poids du ballon et du gaz qu'il renferme : la force ascensionnelle diminue à mesure qu'il s'élève, parce que la densité de l'air va en diminuant.

Mouvement des Corps gazeux.

Les corps gazeux peuvent être en mouvement, 1° par l'action de la chaleur; 2° par des corps qui leur transmettent leur mouvement; 3° lorsqu'ils sont comprimés dans des vases d'où ils peuvent se dégager. Tous les courans d'air qui existent à la surface du globe paraissent provenir du réchauffement ou du refroidissement partiel de l'air; ces variations de température dépendent de tant de causes locales, que jusqu'ici il a été impossible d'en tenir compte et de prévoir le vent; on ne connaît qu'un seul vent régulier, qui règne vers l'équateur d'orient en occident, et qu'on désigne sous le nom de Vent Alisé; il est produit par la différence de l'action du soleil sur les couches d'air voisines de l'équateur et sur celles qui sont au-delà. Tout corps en mouvement dans l'air lui communique une partie de son mouvement : c'est sur ce principe que sont fondés les ventilateurs. Enfin, le dernier mode de mouvement des gas est appliqué dans les soufflets, les appareils à éclairer par le gas hydrogène, etc. Lorsqu'un gas s'écoule d'un réservoir par une ouverture quelconque, le vase éprouve une pression sur la paroi opposée, et si le vase est mobile, il se mouvra en sens contraire de l'écoulement; de là l'explication du recul des armes à feu et du mouvement des artifices.

La résistance de l'air est une force accélératrice qui est proportionnelle à la densité du gaz et au carré de la vitesse; cette force augmente avec l'étendue du corps, et varie avec sa forme, mais suivant des lois inconnues. Lorsqu'un corps se meut dans le gaz par une force constante, la vitesse finit par s'anéantir. Si le corps est sollicité par une autre force accélératrice, le mouvement finit par devenir uniforme.

Lorsqu'un gas se dégage au fond d'un liquide, il se divise en bulles aplaties qui s'élèvent verticalement avec un mouvement accéléré, mais qui deviendrait bientôt uniforme, si la hauteur du liquide était suffisante.

Machines et Appareils dont le jeu est fondé sur les propriétés de l'air.

Machines a dilater et a condenser l'air.
- Machine pneumatique.
- Machine de compression.
- Pompes
  - foulante.
  - aspirante.
  - aspirante et foulante.
- Fontaine de compression.

Appareils hydrauliques dont le jeu est fondé sur les propriétés de l'air.
- Siphon.
- Tâte-vin.
- Ludion.
- Fontaine intermittente.
- Fontaine de Héron.
- Machine de Schemnitz.
- Lampe hydrostatique.

Machines mues par le vent. — Les machines mues par le vent sont de 2 espèces, 1° les navires; 2° les moulins à vent. Les mouvemens que prennent les premiers dépendent de la direction du vent, de celle des voiles et de la quille du navire; les derniers reçoivent, comme on sait, un mouvement de rotation plus ou moins rapide. La construction de ces derniers est aussi parfaite que si la théorie avait dirigé leur formation.

L'Air considéré comme véhicule du son.

Production et propagation du son. — Le son est l'impression produite sur l'organe de l'ouïe par les oscillations rapides des corps élastiques, oscillations qui se transmettent de proche en proche par les corps intermédiaires.

Oscillations des corps sonores. Les oscillations des corps sonores sont isochrones. Les plus lentes donnent les sons les plus graves. Pour

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON.

qu'il y ait un son, il faut qna l'oreille ne puisse pas avoir la sensation individuella de chaque battement : la son la plus grave est produit par un corps qui fait 32 oscillations par seconde.

Mode de propagation. Lorsqu'un corps vibre, il coudense et dilata altarnativement la coucha d'air qui est an contact avec lui, at cas condensations et ces dilatations se communiquent de proche en proche aua couches d'air suivantes, at forment des ondes qui se propagent dans tous les sens.

Vitesse du son dans l'air. Dans una masse d'air de température constante, la vitesse da l'air est uniforme ; les veriations de densité n'altèrent point la vitesse, alla est indépendante da la qualité et de l'intensité du son ; à la température de 10°, la vitesse ast da 337,^{m}2 par seconde.

Réflexion du son. Les ondes sonores, en rencontrant des obstaeles fixes, se réfléchissent en faisant l'angla d'incidence égal è l'angla de réflexion. Lorsque les ondes reviennent au point da départ après une ou plusieurs réflexions, il en résulta un échn.

Propagation simultanée des ondes sonores. Les sons simultanés arrivant à l'oreille sans avoir éprouvé d'altération, il s'ensuit nécessairement que les ondes sonores peuvent se pénétrer sans se troubler ni se confondre ; c'est un cas particulier du principe de la coexistence des petites oscillations.

Propagation du son à travers les autres gaz. On a reconnu que l'intensité du son décroissait avec la densité des gaz à travers lesquels se fait la transmission ; mais on ne connait pas la loi da ce décroissement.

Transmission du son à travers les corps solides. La vitesse du son dens les corps solides ou liquides est beaucoup plus grande qua dans l'air : en désignant par 1 la vitesse dans l'air, elle est 10 $\frac{2}{3}$ dans le laiton, 4 $\frac{1}{3}$ dens l'aun de pluia, 4 $\frac{7}{10}$ dans l'ean da mer.

PERCEPTION ET COMPARAISON DES SONS.

Dans la perception d'un son isolé, il faut distinguer la duréa, l'intensité, l'acuité, le timbre et l'accentoation. La duréa est égale à celle des vibrations du corps sonore. L'intensité dépend de l'amplitude des vibrations ; l'acuité, de leur rapidité ; le timbre, da la nature du corps sonore. Enfin, l'aceentuation est le qualité du son imprimé à l'origina da son émission par la voia humaina. Nous na parlerons que de l'acuité des sons.

Lorsque des sons sont successifs ou simultanés, l'oreille exige qu'ils aient entra eux de certains rapports d'acuité. Si en partant du son le plus grava, on forme une suita de sons en consultant l'oreille, ils seront tals que le 1er et le 8e, le 2e et le 9e, atc., raisonoant ensemble, se confondront ; cette suite formera done une séria de périodes de 7 sons. Les sons renfermés dans chaque période portent les noms d'*ut*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*. Les sons coexistans, qui flattent l'oreille, soot l'octave, la tierce et le quinte, c'est-à-dire, un son avec la 8e, le 3e ou le 5e en-dessus ou en-dessous.

On a trouvé, par la calcul, qua i· apidité des vibrations d'uoe même corde toujours également tendue, était en raison inverse da sa longueur. D'après cette loi, en faisant vibrer une corde dont on pouvait faire verier la longuenr, on en a déduit les rapports des vitesses de vibration des sons de la gamme. On a désigné par ton majeur et ton mineur le rapport entre les vibrations d'un son et celui qui précède, lorsque ce rapport était $\frac{9}{8}$ ou $\frac{10}{9}$, et semi-ton majeur ce même rapport lorsqu'il était $\frac{16}{15}$. Dens la gamme naturelle, les intervalles successifs sont un ton majeur, un ton mineur, un semi-ton majeur, un ton majeur, un ton mineur, un ton majeur, un semi-tou

majeur. Afin de pouvoir faire des gammes qui commenceraient par tout autre son que *ut*, en conservant la même succession de tons et de semi-tons ; on a intercalé entre les sons de la gamme naturelle, des sons que l'on désigne par le nom de la Note Inférirure, suivie du mot *dièse*, ou par celle de la Note Supérieure, suivie du mot *bémol*. La rapidité des vibrations d'une nota diésée est égale à celle de cette note multipliée par $^{25}/_{24}$; celle d'une note bémolisée par $^{24}/_{25}$.

Un rhant musical n'est qu'une gamme variée qui commence par un son quelconque de la gamme naturella indiquée par les dièses et les bémols qui sont à la clef.

Les gammes calquées sur la gamme naturelle sont dites dans le mode majeur. Le mode mineur renferme une autre série de gammes dans lesquelles les intervalles de tons et da demi-tons ne se succèdent pas dans le même ordre.

PERCEPTION ET COMPARAISON DES SONS.

Sons simultanés. Le rapport des vibrations d'un son avec son octave en-dessous est 2, avec la quinte en-dessous est $^{3}/_{2}$, avec sa tierce en-dessous est $^{5}/_{4}$.

Sons harmoniques. Lorsqu'une corde résonne, nn entend distinctement, outre la son fondamental, la double octave de la quinta et la triple octave de la tierce. On distiogue aussi les octaves supérieures ; de sorta qu'en désignant le son fondamental par 1, on entend les sons 1, 2, 3, 4, 5. Il est infiniment probable que la enrde prodnit aussi les sons qui seraient représentés par les autres chiffres de la suite des nombres, mais que leur faiblesse ne laisse pas distingurr. On ne peut expliquer ces sons coexistans, sans admettre que la corde se divise spontanément en parties aliquotes qui vibrent ensemble. La possibilité de ces mouvemens est un cas particulier du principe de la coexistence des petites osrillations. On peut démontrer, par expérience, qu'une corde se sous-divise d'elle-même en parties aliquotes qui vibrent séparément.

Lorsque 2 sons existent ensemble, les battemens qui se rencontrent sont à des distances égales, et par conséquent forment une série de battemens doubles plus lante que chacune d'elles, et produit un son plus grave et plus fort.

Tempérament. Lorsqu'un instrument à sons fixes rend exactement tous les sons de la gamme avec les dièses et les bémols, on n'y trouve pas les tierces et les quintes successives. Le tempérament consiste à modifirr un peu les sons da la gamme, de manièra à retrouver ses iutervalles.

VIBRATIONS DES CORPS SOLIDES.

Procédés pour mettre les corps solides en vibration. Lorsque le corps est terminé par des bords minces, on peut le mettre en vibration en passant un archet sur ses bords, ou en les frottant vivement avec du drap, ou avec le doigt : on peot aussi faire vibrer un corps solide en le mettant en contact avec un autre plus petit sur lequel on agit directement ; enfin, en faisant vibrer à une petite distance un corps qui rende un de ses harmoniques.

Mouvemens produits par les vibrations des corps solides. Les mouvemens vibratoires des corps solides peuvent se diviser en 2 classes : les uns sont perpendiculaires à la surfare des corps, et les autres sont tangentiels. On reconnait l'existence de ces deux modes de vibrations en couvrant la surface du corps d'une poussière fine ; par les premiers mouvamens, la poussière est projetée perpendiculairement ; par les derniers, elle se meut sur la surfaca, et se réunit sur les points immobiles, dont la suite forme ce que l'on désigne sous le nom de Lignes Nodales.

Vibrations d'une verge élastique droite. Une verge droite peut éprouver

Vibrations des corps solides.

3 modes de vibrations ; les vibrations peuvent être longitudinales, transversales ou spirales ; dans chacun de ces modes, la tige se divise en parties qui vibrent séparément.

Vibrations des verges courbes. Le son rendu par une verge courbe dépend non-seulement de sa longueur, mais encore de sa forme. On n'emploie en musique qu'une seule espèce de verge courbe : c'est le diapason.

Vibrations des corps rigides de forme quelconque. Lorsqu'un corps solide de forme quelconque est mis en vibration, il se divise en différentes parties qui vibrent séparément. Les lignes de jonction portent le nom de Lignes Nodales ; indépendamment du son fondamental, il se produit toujours, comme dans les cordes, une série d'autres sons. Il est probable que c'est à ces sons coexistans, qui ne sont pas les mêmes que dans les cordes, qu'est dû le timbre du son produit par les différens corps.

Vibrations des colonnes d'air dans les instrumens a vent.

Dans les instrumens à vent, le son est uniquement produit par la colonne d'air qui y est renfermée ; le timbre est le résultat d'une faible vibration de l'enveloppe.

Mode d'ébranlement. Lorsque le tuyau est ouvert par les 2 bouts, on ébranle la colonne d'air avec un bec de sifflet ou avec une anche. Lorsque le tuyau est ouvert par un bout et fermé par l'autre, on fait arriver un courant d'air contre les bords du côté ouvert.

Vibrations dans un tuyau cylindrique fermé par un bout et ouvert par l'autre. La colonne d'air se divise en tranches égales qui vibrent séparément ; le fond du tuyau est toujours un nœud de vibration, et la partie ouverte, le milieu d'une tranche vibrante. Les sons que peut rendre un même tuyau sont représentés par la suite des nombres impairs.

Vibrations dans un tuyau cylindrique ouvert par les deux bouts. La colonne d'air se divise en tranches égales qui vibrent séparément ; les extrémités sont des milieux de tranches vibrantes, et les sons que peut émettre un même tuyau sont représentés par la suite naturelle des nombres.

Tuyaux de diamètre inégal. La colonne d'air se divise encore en tranches qui vibrent séparément, mais ces parties ne sont point égales entre elles.

Explication des différens instrumens à vent. Dans ceux dont la colonne d'air a une longueur invariable, on n'obtient les sons consécutifs de la gamme que dans les octaves très-élevées. Dans la trombone, on alonge ou on raccourcit directement le tuyau ; dans les autres, on produit le même effet, en ouvrant ou en fermant les ouvertures qui sont pratiquées le long du tuyau.

Communication des mouvemens vibratoires.

Lorsqu'un corps est en vibrations sonores, il communique ces vibrations à tous les corps élastiques, avec lesquels il est en contact immédiat. Le son qui résulte des vibrations de plusieurs corps en contact avec un seul sur lequel on agit, n'est pas exactement le même que celui qui résulterait du même mode de vibration de chacun des corps isolément. Il résulte de tout ce qui précède, que les sons rendus par un corps sont augmentés, 1° par les vibrations des corps avec lesquels il est en contact ; 2° par les vibrations des corps éloignés qui peuvent rendre un de ses harmoniques ; 3° par les vibrations de toutes les membranes élastiques ; 4° par les échos très-voisins.

ORGANES DE L'OUIE ET DE LA VOIX.	*Organe de l'Ouïe.* Dans l'homme l'organe de l'ouïe est composé du pavillon, du conduit auditif, de la membrane du tympan, de la caisse du tympan, de la chaîne des osselets, de la trompe d'Eustache, et des membranes de la fenêtre ovale et de la fenêtre ronde, et du labyrinthe, dans lequel se trouvent les dernières ramifications du nerf acoustique. Le pavillon sert à diriger et à concentrer les ondes sonores dans le conduit auditif; il entre aussi probablement lui-même en vibration. La membrane du tympan entre en vibration sous l'influence de toutes les ondes sonores, et les communique, par la chaîne des osselets, à la membrane de la fenêtre ovale, et cette dernière au liquide dans lequel est plongé le nerf acoustique; la chaîne des osselets est probablement aussi destinée à faire varier la tension de la membrane du tympan, afin d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de ses vibrations. *Organe de la Voix.* L'organe de la voix dans l'homme et dans tous les animaux qui en sont pourvus, est un instrument à vent, semblable au tuyau à anche libre des orgues. Les poumons servent de soufflet, la trachée de porte-vent, la glotte d'anche, l'épiglotte de lame mobile, la bouche et les fosses nasales de tuyau pour l'écoulement de l'air. L'appareil vocal peut produire une grande variété de sons et sous le rapport de l'acuité et sous celui de l'intensité, par les variations de longueur des parties libres des lèvres de la glotte, par la vitesse du courant d'air et l'abaissement plus ou moins considérable de l'épiglotte. La voix est d'autant plus grave que les lames de la glotte sont plus longues; aussi elles le sont plus dans l'homme que dans la femme, plus dans l'homme fait que dans l'enfant.

SECONDE PARTIE.

Fluides Impondérables.

353. Un grand nombre de phénomènes ont conduit à admettre l'existence de plusieurs fluides, d'une subtilité extrême, qui pénètrent tous les corps, et sont complètement dépourvus de pesanteur. Les fluides impondérables, admis jusqu'ici, sont au nombre de 5, savoir : le Calorique, les Fluides Électrique, Magnétique, Galvanique, et la Lumière.

Il est à présumer que ces fluides ne sont pas tous différens les uns des autres, et que plusieurs ne sont que des manières d'être diverses d'un seul et même fluide; mais comme ce ne sont encore que des conjectures probables, nous les admettrons tous, en nous réservant de faire connaître leurs similitudes et leurs différences.

CHAPITRE Ier.

Du Calorique.

354. Au commencement de cet ouvrage nous avons parlé du calorique, nous l'avons regardé comme un fluide dont tous les corps étaient pénétrés, qui jouissait d'une grande force expansive, et qui avait pour tous les corps une affinité variable pour chacun d'eux. C'est par ces différentes propriétés du calorique et par l'attraction moléculaire que nous avons expliqué les différens états des corps (108... 114). Deux hypothèses ont été émises sur la nature intime de la chaleur : dans la première on regarde le calorique comme un fluide dont toutes les molécules douées d'une grande force répulsive se meuvent avec une grande vitesse, et s'accumulent dans les corps à mesure que l'intensité des effets de la chaleur y augmente; l'autre admet un fluide jouissant des mêmes

propriétés, mais considère les effets de la chaleur comme résultant des vibrations moléculaires des corps, vibrations qui se transmettent à distance par l'intermède du calorique, comme les vibrations sonores se transmettent par l'air : les corps les plus chauds seraient ceux dans lesquels les vibrations sont les plus rapides. Aucune de ces deux hypothèses n'est suffisamment démontrée par les faits connus : heureusement les lois physiques de la chaleur sont indépendantes de ces hypothèses, et resteront toujours les mêmes, quelle que soit la manière dont le calorique agisse ponr produire les effets que nous connaissons; cependant, comme dans la première hypothèse les faits sont plus faciles à énoncer, nous l'admettrons. Nous allons maintenant examiner tous les phénomènes produits par le calorique; mais avant d'entrer en matière, nous devons quelques explications sur plusieurs mots que nous emploierons fréquemment.

La température ou la chaleur sensible d'un corps est la quantité de chaleur qui se dégage à cet instant du corps pour se porter dans l'espace ou sur les corps environnans. L'impression que fait sur nos organes la température d'un corps, ne peut pas en être une mesure, car un même corps dans les mêmes circonstances peut nous affecter d'une manière fort différente, attendu que les sensations de froid et de chaud n'ont rien d'absolu en elles-mêmes, qu'elles sont toujours le résultat d'une comparaison de la sensation qui a précédé : que l'on plonge la main dans de la glace, elle paraîtra froide; mais si avant on l'a plongée dans un mélange frigorifique à une plus basse température, elle paraîtra brûlante.

Parmi tous les effets produits par la chaleur, celui qui a paru le plus propre à mesurer l'intensité de la chaleur, c'est la dilatation. C'est aussi sur cet effet que sont fondés tous les instrumens qu'on désigne sous le nom de *Thermomètre*. Ce n'est point ici le lieu d'expliquer leur construction, car la connaissance de toute la théorie de la chaleur est nécessaire pour cet objet. Nous entendrons seulement sous le nom de Thermomètre un instrument qui sert à mesurer la température, dont l'échelle, divisée en degrés égaux, indique des accroissemens égaux de température. Le zéro de l'échelle correspond à la température de la glace fondante, et le 100e à celle de l'eau bouillante.

§ I[er].

Calorique Sensible.

355. Nous entendons par calorique sensible celui qui produit les effets connus sous les noms de *Chaleur* et de *Froid*, celui dont on mesure les effets par le thermomètre. Nous examinerons successivement celui qui traverse l'espace pour se porter d'un corps sur un autre, celui qui se meut dans l'intérieur d'un même corps; et, enfin le réchauffement et le refroidissement des corps qui dépendent de ces deux mouvemens du calorique.

A. *Calorique Rayonnant.*

356. Lorsqu'un corps à une température quelconque est plongé dans l'air ou dans un fluide à une plus basse température, il se refroidit, et finit par atteindre exactement la température du milieu (1) dans lequel il est plongé. Il résulte de ce fait qu'un corps plus chaud que ceux qui l'environnent, leur cède successivement son excès de chaleur, pour se mettre en équilibre de température avec eux : si le corps chaud a une masse très-considérable relativement à celle du milieu ambiant, la température commune diffère peu de la température initiale du corps; mais si la masse du corps échauffé est très-petite relativement à celle du milieu ambiant, la température d'équilibre diffère peu au contraire de celle du milieu, à l'origine du refroidissement. On conçoit d'après cela que toutes les fois que l'on met un thermomètre en contact avec un corps, la température que l'on estime est celle qui a lieu lorsque l'équilibre existe, et non rigoureusement celle du corps à l'instant de l'immersion de l'instrument ; par conséquent, il est nécessaire que la masse du thermomètre soit toujours très-petite relativement à celle du corps dont on veut mesurer la température.

(1) Le mot *milieu* est synonyme de fluide, qui peut être liquide ou gazeux.

357. Lorsqu'un corps est renfermé dans une enceinte vide à une température inférieure, le corps se refroidit encore, et finit, comme dans l'expérience déjà citée, par se mettre en équilibre de température avec l'enceinte. Il résulte de là que le calorique d'un corps chaud isolé dans le vide, traverse l'espace vide qui le sépare des corps environnans ; ainsi, les corps chauds se refroidissent non-seulement en cédant une partie de leur calorique aux corps qui sont en contact avec eux, mais encore ils lancent du calorique dans toutes les directions ; c'est ce dernier qu'on a désigné sous le nom de *Calorique Rayonnant*. Dans le premier cas que nous avons considéré, le refroidissement est dû au rayonnement et au contact des corps environnans ; dans le second, il est uniquement dû au rayonnement.

358. *Le calorique rayonnant se meut en ligne droite avec une très-grande vitesse, et se réfléchit contre les surfaces polies sous un angle d'incidence égal à l'angle de réflexion.* Soit MN (*fig.* 217) une portion de surface sphérique, et A un point quelconque d'où émanent des rayons rectilignes. Nous démontrerons plus tard que si tous ces rayons jouissent de la propriété de se réfléchir sous un angle égal à celui d'incidence, les rayons réfléchis iront tous passer sensiblement par un point F, que l'on nomme *Foyer du Miroir*.

Cela posé, si au foyer d'un miroir sphérique MN (*fig.* 218) on place un thermomètre, et en avant un corps chaud K assez éloigné pour qu'il n'exerce sur le thermomètre aucune influence directe, le thermomètre s'élève rapidement, tandis que ceux qui seraient placés en avant ou en arrière du foyer n'éprouveraient aucune variation sensible. Il résulte évidemment de là, que le miroir concentre à son foyer la chaleur qu'il reçoit du corps chaud, et comme cela ne peut avoir lieu qu'autant que la chaleur se meut en ligne droite et qu'elle se réfléchit contre sa surface dans un plan perpendiculaire, sous un angle d'incidence égal à l'angle de réflexion, il s'ensuit nécessairement que la chaleur rayonnante jouit de ces propriétés.

Pour rendre les variations de température du foyer très-sensibles, et surtout pour que les indications de l'instrument soient indépendantes des

variations de température de l'air ambiant, on place ordinairement au foyer un des deux appareils que nous allons décrire. Le premier, connu sous le nom de *Thermoscope*, est dû à M. de Rumfort; il consiste (*fig.* 219) en un tube capillaire A B, dont les extrémités recourbées verticalement sont terminées par deux boules de verre fermées, à peu près d'égales dimensions, et pleines d'air; dans la partie horizontale du tube se trouve une petite colonne de mercure *m n* qui sépare la capacité des deux boules; on dispose l'appareil de manière à ce que les deux boules étant à la même température, l'index de mercure se trouve au milieu de la ligne A B; la plus légère différence de température des deux boules déplace l'index, et le porte du côté de celle dont la température est la plus basse. L'autre appareil, découvert en même temps par M. Leslie, a reçu de son auteur le nom de *Thermomètre Différentiel;* il consiste, comme le thermoscope de Rumfort, en un tube A B deux fois recourbé (*fig.* 220), dont les extrémités sont terminées par deux boules pleines d'air. La seule différence qu'il y ait entre cet instrument et celui que nous venons de décrire, consiste en ce que dans celui-ci les tiges verticales sont plus longues, les boules plus voisines, et que l'index est une longue colonne d'acide sulfurique colorée par du carmin. Ces deux instrumens sont d'une extrême sensibilité, mais ils indiquent seulement les différences de températures des deux boules; donc si on les place de manière que l'une d'elles soit au foyer du miroir, et l'autre soumise seulement à l'action de l'air, l'instrument indiquera les plus légères différences entre la température de l'air et celle du foyer.

Si dans l'expérience de la *fig.* 218 on place au foyer la boule d'un thermoscope et un écran entre le corps chaud et le miroir, et si on enlève subitement l'écran, on ne peut estimer aucun temps appréciable entre l'instant où l'écran est enlevé et celui où commencent les indications du thermoscope, quelle que soit d'ailleurs la distance du corps chaud au miroir, pourvu toutefois que cette distance ne soit pas assez grande pour que le corps chaud ne puisse plus avoir d'influence sur l'instrument. Il résulte de là que la transmission de la chaleur se fait avec une grande rapidité.

Lorqu'on interpose entre le miroir et le corps chaud un écran de verre, une grande partie de la chaleur est interceptée, et, toutes choses égales d'ailleurs, il y en a d'autant moins que le corps chaud est à une plus haute température, et que l'écran est plus mince. M. Delaroche, à qui on doit ces observations, a aussi remarqué que les rayons de chaleur qui avaient déjà passé à travers le verre, traversaient plus facilement de nouvelles lames.

359. *L'intensité d'un rayon calorifique émané d'une surface quelconque est proportionnelle au sinus de l'angle formé par la direction de ce rayon avec la surface.* Par exemple, soit M N (*fig.* 221) une surface rayonnante; si nous considérons un point quelconque A de cette surface, ce point lancera des rayons calorifiques dans toutes les directions A B, A C, A D, etc. La loi en question consiste en ce que si on désigne par I l'intensité du rayon normal A B, et par a l'angle de la droite A B avec le plan tangent X Y, l'intensité du rayon A B sera représentée par I *sin a;* de sorte que l'intensité des rayons va en diminuant depuis la normale où elle est à son maximum, jusqu'au plan tangent où elle est nulle. On peut facilement reconnaître que l'intensité des rayons ne peut pas être la même sous toutes les inclinaisons, et qu'elle doit diminuer à mesure que les rayons s'inclinent davantage, et que cette diminution doit suivre la loi énoncée; en effet, soit A B (*fig.* 222) la surface d'un corps échauffé; si par tous les points rayonnans de cette surface on mène des rayons parallèles dans différentes directions, il est évident que les rayons sont d'autant plus serrés, qu'ils appartiennent à des faisceaux plus inclinés; par conséquent, un même corps recevant d'autant plus de rayons que la surface se présenterait à lui sous une plus grande inclinaison, si les rayons avaient une intensité indépendante de leur inclinaison, le corps recevrait de A B une chaleur qui serait d'autant plus grande que la surface A B serait plus inclinée par rapport à lui; au point m il pourrait n'en recevoir qu'une très-petite, et au point m''' être incandescent. L'observation prouve au contraire qu'un corps reçoit toujours de la surface A B la même quantité de chaleur, quelle que soit sa position relative à cette surface, pourvu que sa distance ne change pas. Il faut donc en conclure que les rayons doivent avoir une intensité proportionnelle à leur rapprochement; or, si A et B (*fig.* 223) représentent deux points rayonnans voisins, A C et B D deux rayons normaux, et A C' et B D' deux autres rayons parallèles, en désignant par 1 la distance A B des rayons normaux, et par a l'angle C' A B, la distance B m des rayons inclinés sera $\sin a$, et en désignant par I l'intensité des rayons normaux, et par X celle des rayons obliques, on aura $I : X :: 1 : \sin a$ d'où $X = I \sin a$.

Il reste maintenant à déterminer la cause qui fait ainsi varier l'intensité des rayons calorifiques; cette cause réside en ce que le rayonnement n'a pas lieu uniquement par les molécules qui sont à la surface, mais aussi par celles qui sont placées à une petite distance de la surface: il est évident que les rayons qui partent de ces points intérieurs traversent, pour arriver à la surface, des distances d'autant plus grandes, qu'ils sortent sous de plus petites inclinaisons; on doit d'abord conclure de là qu'ils doivent être d'autant plus affaiblis, qu'ils sortent sous une plus petite inclinaison; mais pour en déduire la loi numérique à laquelle l'expérience nous a conduit, il semble qu'il faudrait connaître la loi suivant laquelle l'intensité des rayons diminue en traversant une partie de la masse du corps rayonnant; mais cette connaissance n'est point nécessaire, et M. Fourrier, à qui nous devons l'explication que nous venons de donner, en a conclu la loi numérique précédente.

360. *Influence de la surface des corps sur la réflexion, l'émission et l'absorption de la chaleur.* On a reconnu, par l'observation, que les corps réfléchissaient d'autant mieux le calorique qu'ils étaient mieux polis, et que les facultés absorbante et émissive augmentaient ou diminuaient ensemble, et variaient en sens contraire du pouvoir réflecteur. Ces expériences ont été faites au moyen de l'appareil à miroir (*fig.* 218). Pour observer l'influence de l'état de la surface sur la faculté réfléchissante, on employait un corps chaud K toujours à la même température (1) et à la même distance du miroir; on plaçait la boule d'un thermoscope au foyer et faisant varier l'état de la surface du miroir en la couvrant de vernis, de papier, de noir de fumée, les variations du thermoscope indiquaient dans quel sens se faisaient celles de la surface réfléchissante. Pour observer l'influence de la surface sur le pouvoir émissif, on se servait d'un cube en fer-blanc (*fig.* 224) dont les deux faces latérales étaient recouvertes de différentes substances pour en ternir l'éclat: par exemple, de papier, de baudruche, de toile, de noir de fumée; on plaçait le cube plein d'eau bouillante devant le miroir, et on observait les indications du thermoscope correspondantes aux différentes faces que l'on présentait au miroir. Quant aux expériences relatives à la faculté absorbante, on

(1) Un vase de fer-blanc plein d'eau ou d'huile bouillante remplit parfaitement la condition, parce que tous les liquides bouillent à des températures invariables.

ne faisait varier dans l'appareil que l'état de la surface de la boule du thermoscope exposée au foyer.

Le rapport inverse des facultés absorbantes et réfléchissantes est évident, car toute la chaleur qui vient frapper la surface d'un corps est ou absorbée ou réfléchie ; par conséquent, plus il y en a de réfléchie, et moins il y en a d'absorbée ; mais il n'en est pas de même du rapport direct des pouvoirs émissifs et absorbans : il faut nécessairement admettre, pour expliquer ce fait, que la surface agit de la même manière sur la chaleur qui se présente pour entrer, et sur celle qui tend à sortir. Nous reviendrons bientôt sur cette proposition, et nous verrons que ce n'est que par cette supposition que l'on peut expliquer la permanence, à une température constante, d'un corps placé dans une enceinte à la même température, quelle que soit d'ailleurs l'intensité de ses pouvoirs réflecteurs émissifs et absorbans.

361. *Équilibre mobile de température.* Une parabole (*fig.* 225) est une courbe plane M N sur l'axe X Y de laquelle se trouve un point F, qu'on désigne sous le nom de *Foyer*, et qui jouit de la propriété suivante. Si par le point F on mène contre la courbe une droite quelconque F A, et par le point A une ligne A B parallèle à l'axe, les droites A B et A F sont également inclinées sur la tangente *m n* à la courbe; il suit de là, que si le point F était un foyer de rayons rectilignes, jouissant de la propriété de se réfléchir en faisant l'angle d'incidence égal à l'angle de réflexion, le faisceau réfléchi serait parallèle à l'axe X Y ; réciproquement si un faisceau de rayons parallèles à l'axe X Y venait frapper la courbe, les rayons réfléchis passeraient tous par le foyer F. Si on conçoit que la parabole M N tourne autour de son axe X Y, elle engendrera une surface de révolution (*fig.* 225 *bis*), qu'on désigne sous le nom de *Paraboloïde*. Il est évident que cette surface aura, de même que la parabole, un foyer F qui jouira des mêmes propriétés. Soit (*fig.* 225 *ter*) deux miroirs paraboliques M et N en regard, dont les axes se confondent. Supposons qu'au foyer F de l'un d'eux on place un corps chaud, et un thermomètre à l'autre foyer F' ; il est évident, d'après ce qui précède, que tous les rayons émanés du foyer F se réfléchiront contre le miroir M,

et formeront un faisceau de rayons parallèles à l'axe qui, reçus et réfléchis par le second miroir, iront tous passer par le foyer F'. On peut avec cet appareil répéter toutes les expériences que nous avons indiquées (358, 360). Si le corps placé au foyer F est à une température plus élevée que le thermomètre placé à l'autre foyer, le thermomètre monte et même rapidement, quoique les miroirs soient à une grande distance ; mais si le corps placé au foyer F est à une basse température, si c'est par exemple une masse de glace, ou un mélange frigorifique renfermé dans un vase mince de verre, le thermomètre baisse. Ce dernier phénomène ne peut être expliqué qu'en admettant que le corps froid et le thermomètre rayonnent tous deux à la fois, et s'envoient des quantités de chaleurs d'autant plus grandes qu'ils sont à une plus haute température : alors celui qui est le plus froid recevant plus qu'il ne donne, s'échauffe, et l'autre donnant plus qu'il ne reçoit, se refroidit. Nous devons conclure de cette expérience que tous les corps, quelle que soit leur température, rayonnent continuellement de la chaleur, en reçoivent constamment des corps environnans, et que le refroidissement, l'échauffement et la permanence de température proviennent uniquement de ce que l'émission est plus grande, plus petite ou égale à l'absorption.

Le réchauffement et le refroidissement des corps se conçoivent facilement ; mais la permanence de température entre un grand nombre de corps dont les surfaces peuvent avoir de très-grandes différences de pouvoirs absorbans ou émissifs, ne se conçoit pas aussi facilement. Nous allons chercher à l'expliquer. Imaginons une enceinte close renfermant un grand nombre de corps de forme, de dimensions et de surfaces différentes, et tous à la même température ; pour que cette permanence subsiste au milieu des émissions, absorptions et réflexions de chaleur qui ont lieu à la surface de chacun de ces corps et qui sont variables pour chacun d'eux, il faut nécessairement qu'à chaque instant et pour chaque point de la surface des corps, il sorte et il entre la même quantité de chaleur ; soit M N (*fig.* 226) la surface d'un des corps de l'enceinte ; considérons une portion très-petite de cette surface, recevant un faisceau de rayon calorifique dans la direction R A, et dont nous représenterons l'intensité par I ; une certaine portion a I de ce faisceau sera absorbée, et l'autre I $(1-a)$ sera réfléchie régulièrement, suivant A S, sous un angle égal à celui d'incidence : mais puisque la température du corps reste constante, il faudra qu'il sorte, suivant A S, une quantité de chaleur égale à a I ; il faudra donc qu'à la quantité $I - aI$

réfléchie régulièrement, suivant cette direction, il se joigne une quantité a I provenant du rayonnement : on peut considérer cette quantité de chaleur comme provenant d'un faisceau d'intensité I qui de l'intérieur se mouvrait, suivant T A, et qui éprouverait une réflexion, suivant A U, qui ferait rentrer dans cette direction une quantité de chaleur $I - aI$, et qui laisserait échapper, suivant A S, un rayon d'intensité aI : à égalité de température, a est une quantité qui n'a aucune influence, et la permanence de température est principalement fondée sur cette propriété de la surface des corps, d'agir de la même manière sur les rayons venus du dehors ou de l'intérieur; mais lorsque la température d'un corps est différente de celle des corps qui l'environnent, les intensités I et I' des rayons extérieurs et intérieurs sont différentes; la chaleur absorbée est Ia, et celle qui est émise est $I'a$; la différence entre l'absorption et l'émission est $a(I - I')$; quantité nulle lorsque $I = I'$; positive lorsque I est plus grand que I', et négative lorsque I est plus petit que I'. Mais cette propriété de la surface, d'agir de la même manière sur les rayons qui tendent à entrer ou à sortir, n'est pas suffisante pour maintenir la température; il faut encore que la densité des faisceaux émis et absorbés soit la même, quelle que soit d'ailleurs leur inclinaison; or, pour que cette condition soit remplie, il faut nécessairement que la densité de chaque rayon émis soit proportionnelle au sinus de l'angle formé avec la surface d'émission (359): en admettant cette loi qui est en résultat de l'expérience; les faisceaux de chaleur, émis et absorbés, auront toujours la même dencité, et par une surface quelconque prise dans l'intérieur de l'enceinte, il passera toujours à chaque instant la même quantité de chaleur.

B. *Propagation de la chaleur à travers les Corps.*

362. Nous venons d'examiner les lois du mouvement du calorique libre qui se meut dans l'espace, qui sort des corps ou se réfléchit à leur surface. Nous allons maintenant examiner les mouvemens du calorique dans l'intérieur des corps; cette connaissance nous est absolument indispensable pour étudier les lois du réchauffement ou du refroidissement des corps; car, lorsque la température d'un corps diffère de celle du milieu ambiant, son échauffement dépend non-seulement des phénomènes d'émission, d'absorption et de réflexion qui ont lieu à sa surface, mais encore de la manière dont la chaleur reçue se distribue dans sa masse, et de la manière dont est fournie celle que rayonne sa surface.

363. *Propagation de la chaleur dans les gaz.* Lorsque nous avons

rapporté les expériences faites avec les miroirs réflecteurs, nous avons vu que la présence de l'air n'altérait en aucune manière le rayonnement; les rayons traversaient facilement la masse de gaz qui séparait le corps du miroir, et le miroir de son foyer : nous devons conclure de là que les gaz sont perméables à toute profondeur au calorique rayonnant; par conséquent, si une masse de gaz était échauffée par le rayonnement d'un corps extérieur, la totalité de cette masse le serait directement, mais elle ne le serait certainement pas également : les parties les plus voisines du foyer de rayonnement le seraient plus que les autres; mais les différences de températures qui seraient produites par cette pénétration directe, ne pourraient subsister; car, comme nous le verrons bientôt, les gaz, ainsi que les autres corps, se dilatent par la chaleur, et cette augmentation de volume, inégale dans le gaz dont les parties sont inégalement échauffées, produirait des mouvemens qui répartiraient bientôt uniformément la température; à la vérité, cette dilatation et les mouvemens qui en sont la suite ne pourraient subsister qu'autant que le gaz ne serait pas soumis à une pression invariable; mais, dans ce dernier cas, les différences de forces élastiques qu'établiraient les différences de température, produiraient des mouvemens correspondans qui amèneraient bientôt l'égalité de température dans toute la masse. Il y a pourtant un cas dans lequel les mouvemens dont nous venons de parler ne pourraient pas exister : ce serait celui ou le foyer de chaleur serait au-dessus de la masse gazeuse, les gaz étant renfermés dans un vase ouvert à la partie supérieure et fermé par la partie inférieure; nécessairement, au commencement du réchauffement, les couches de gaz les plus voisines du foyer de chaleur seraient les plus échauffées, et il serait impossible que l'égalité de température pût s'établir dans toute la masse par le rayonnement des couches de gaz; car ce rayonnement, quelque grand qu'on le suppose, dépendrait nécessairement de la température de chaque couche, et irait en diminuant depuis les couches les plus voisines du foyer d'émission.

Quant au rayonnement des gaz, on n'a fait aucune expérience pour mesurer son intensité; on ne sait pas s'il est le même pour tous les

gaz dans les mêmes circonstances, et comment, dans chaque gaz, il varie avec la pression et la température ; on sait seulement qu'il est très-faible, en comparaison de celui des corps solides et des corps liquides, et qu'il est probable que ce rayonnement de molécule à molécule se fait proportionnellement à la différence de température des deux molécules, du moins lorsque cette différence est très-petite.

364. *Propagation de la Chaleur à travers les Corps liquides.* Il n'en est pas des liquides comme des gaz ; dans ces derniers, le calorique rayonnant peut pénétrer à une grande profondeur sans être ni dévié ni absorbé ; dans les corps liquides, les rayons qui se présentent à leur surface sont réfléchis ou absorbés par une couche extrêmement mince de leur surface dont ils élèvent la température, et de là, par un rayonnement de molécule à molécule, le calorique reçu et absorbé par la surface se transmet dans l'intérieur ; mais le transport de la chaleur se fait principalement dans les liquides comme dans les gaz, au moyen des mouvemens produits par les variations de densité, qui sont une conséquence nécessaire des différences de températures.

Le rayonnement de molécule à molécule est extrêmement faible dans les corps liquides; on peut le démontrer par l'expérience suivante. Dans un vase de verre M (*fig.* 227) plein d'un liquide quelconque et percé inférieurement d'une tubulure *e*, on place un thermoscope très-sensible *a b c d* dont la boule *a* soit à une très-petite distance de la surface du liquide ; on met un écran *f* devant la boule *d*, ensuite on fait flotter à la surface de l'eau un vase de métal mince, de fer-blanc par exemple, plein d'eau ou d'huile bouillante : la boule du thermoscope, quoique à une très-petite distance du vase, ne s'échauffe pas sensiblement; ce qui prouve que le rayonnement de ce vase ne pénètre dans le liquide qu'à une très-petite distance, et que le rayonnement des couches de liquides qui sont immédiatement en contact avec le vase, est extrêmement faible. Mais si la masse liquide était échauffée par le bas ou par les parties latérales du vase, la couche d'eau, en contact immédiat avec la paroi échauffée, devenant plus légère, s'élèverait et serait remplacée par d'autres qui, après s'être échauffées, s'élèveraient à leur tour ; de sorte qu'il se for-

merait deux courans, un de couches chaudes qui monte, et un de couches froides qui descend; on peut rendre visible ce double courant en mettant dans un vase de verre, que l'on fait échauffer par sa partie inférieure, de la sciure de bois ou tout autre corps, dont la densité diffère peu de celle de l'eau; les deux courans entraînent ces particules solides de bas en haut et de haut en bas.

365. *Propagation de la Chaleur à travers les Corps solides.* Les corps solides comme les corps liquides arrêtent à leurs surfaces les rayons de chaleur; là une partie est réfléchie, l'autre est absorbée par une couche très-mince de la surface; et comme dans les corps solides les différentes parties sont immobiles, la chaleur ne peut se répartir dans l'intérieur que par un rayonnement de molécule à molécule; ce rayonnement, dans les corps solides, est beaucoup plus grand que dans les corps liquides; mais son intensité, toutes choses égales d'ailleurs, change avec la nature des corps.

Les corps solides, avons-nous dit, propagent la chaleur très-inégalement; c'est un fait attesté par un grand nombre d'expériences journalières. Tout le monde sait que l'on peut tenir impunément un tube de verre à une très-petite distance du point où il est en fusion; tandis que si une barre de fer est chauffée au rouge à une de ses extrémités, ce n'est qu'à une très-grande distance de cette extrémité que la main en pourra soutenir la température. On peut rendre l'inégalité de faculté conductrice des métaux sensible à l'œil par l'expérience suivante: une caisse rectangulaire en fer-blanc M (*fig.* 228) est garnie latéralement d'un grand nombre de tubulures dans lesquelles on mastique des cylindres égaux *a, b, c, d, e, f* de différentes substances; on les plonge ensuite tous à la fois dans de la cire fondue, et on les retire promptement; la couche mince de cire qui les recouvre se solidifie par le refroidissement; lorsque la cire est congelée sur tous, on remplit le vase M d'huile bouillante; la chaleur se propage dans les cylindres, et l'on juge par la rapidité de la fusion de la cire sur chacun d'eux, de la rapidité de la propagation de la chaleur. D'après les expériences d'Inghenhouse, l'argent et l'or sont les métaux les meilleurs conducteurs; après viennent le cuivre, l'étain et le platine

à peu près au même degré, ensuite le fer, l'acier et le plomb; le verre, la porcelaine et les poteries sont inférieurs aux métaux; le charbon et les bois secs conduisent plus mal encore; enfin, les corps les plus mauvais conducteurs, sont les substances composées de filamens très-fins qui se touchent par très-peu de points, tels que le cuir, le coton, la laine en flocons, les brins de soie, le duvet, le son, la paille, etc.

M. Fourrier, dans un très-bel ouvrage sur la théorie de la chaleur, a donné les lois du mouvement de la chaleur dans les corps solides, en partant de ce principe, que le rayonnement de molécule à molécule est proportionnel à la différence de température.

C. *Lois du Réchauffement et du Refroidissement.*

366. Pour observer la loi du refroidissement d'un corps liquide, on se sert de l'appareil (*fig.* 229), qui est composé d'un vase cylindrique mince, rempli d'eau bouillante, et terminé supérieurement par une tubulure qui reçoit un thermomètre. On observe, avec une bonne montre à secondes, la hauteur du thermomètre à des intervalles égaux. Newton trouva ainsi que la perte de chaleur était à chaque instant proportionnelle à l'excès de la température du corps sur celle de l'air environnant. Long-temps on a cru cette loi exacte; mais lorsqu'on a voulu la vérifier, on a reconnu qu'elle n'était vraie que dans le cas où la température du corps n'excédait celle de l'air que de 45 à 50 degrés: pour une plus grande différence, elle est entièrement fausse. Plusieurs physiciens ont cherché à découvrir la véritable loi du refroidissement; mais comme le refroidissement dans l'air est produit et par le rayonnement et par le gaz environnant qui, en s'échauffant par son contact avec le corps, produit un courant continuel, la loi cherchée est très-compliquée, et n'a pu être trouvée qu'en déterminant successivement la loi du refroidissement dans le vide, et l'influence seule de l'air ambiant. C'est ce qu'ont fait MM. Dulong et Petit. Nous allons donner le résultat de leur travaux.

367. L'appareil dont ils se sont servi consistait (*fig.* 230) en un grand ballon de cuivre mince, terminé supérieurement par un plateau *a* de glace, percé à son

centre d'un trou circulaire dans lequel entrait un bouchon à travers lequel passait la tige d'un thermomètre M ; sur la plaque de glace a se posait un manchon de verre C, dont la partie inférieure s'appliquait exactement sur la glace, et dont la partie supérieure était garnie d'une douille recevant un tube à robinet, que l'on faisait communiquer par des tuyaux de plomb très-flexibles avec une machine pneumatique et avec une cloche pleine du gaz que l'on voulait introduire dans le ballon. On commençait par enlever le plateau a avec le thermomètre, en soulevant le cylindre C; on chauffait le thermomètre jusqu'à l'ébullition du mercure; on replaçait le plateau et le cylindre C; on lutait les jointures du plateau; on faisait le vide, que l'on maintenait pendant la durée de l'observation, si le refroidissement devait avoir lieu dans le vide, ou bien on remplissait le ballon du gaz dans lequel on voulait observer le refroidissement : le ballon A était plongé dans une cuve en bois pleine d'eau que l'on maintenait à une température constante; cette eau était échauffée par un courant de vapeur qui venait s'y dissoudre. Ces expériences, faites avec le plus grand soin, ont conduit aux résultats suivans.

Les lois que nous allons exposer appartiennent à tous les liquides, quelles que soient leurs masses, parce que dans ces corps la température à chaque instant reste la même dans tous les points; mais elles ne sont point applicables aux corps solides de dimensions finies: il faudrait, pour trouver les lois de leur refroidissement, connaître et introduire leur faculté conductrice.

Lois du refroidissement d'un liquide quelconque renfermé dans une enceinte vide à une température quelconque.

La vitesse du refroidissement est représentée par l'équation.

$$V = m\,a^{\theta}\,(a^{t} - 1).\ (A).$$

m étant un coefficient qui dépend de la faculté rayonnante de la surface, a un nombre constant pour tous les corps, égal à 1,0077, et θ la température de l'enveloppe de l'enceinte.

1re *Loi.* Si l'on pouvait placer un corps dans un espace vide terminé par une enceinte privée de la faculté de rayonner, les vitesses de refroidissement décroîtraient en progression géométrique, lorsque les températures diminueraient en progression arithmétique; car le rayonnement de l'enceinte est exprimé par $m\,a^{\theta}$, et la formule précédente devient $V = m\,a^{\theta}\,a^{t}$.

2me *Loi.* La température de l'enceinte restant constante, les vitesses du refroidissement, pour des excès de température en progression arithmétique, décroissent comme les termes d'une progression géométrique, diminués d'un nombre constant. Cette loi résulte de l'inspection seule de la formule (A). Le nombre constant est le même pour tous les corps, et égal à 1,0077.



3me *Loi.* Les vitesses absolues du refroidissement croissent en progression géométrique, lorsque la température de l'enceinte croît en progression arithmétique, et le rapport de cette progression est encore 1,0077 pour tous les corps. Cette loi résulte de ce que dans la formule (A), toutes les vitesses sont multipliées par le coefficient $m a^{\theta}$ dans lequel m est constant.

Lois du refroidissement dans un gaz quelconque, dues au seul contact de ce gaz.

Les vitesses sont représentées par la formule

$$V = n p^{c} t^{b} \text{ (B).}$$

n est un coefficient qui dépend de la nature du gaz et des dimensions du corps; p représente l'élasticité du gaz; c est un nombre constant pour le même gaz, et qui varie d'un gaz à un autre; t est l'excès de température du corps, et b est pour tous les gaz et tous les corps, égal à 1,233.

1re *Loi.* La vitesse du refroidissement due au seul contact d'un gaz est entièrement indépendante de la nature de la surface des corps. Cette loi résulte de ce que dans la formule aucun coefficient ne dépend de la nature de cette surface.

2me *Loi.* La vitesse du refroidissement due au seul contact d'un fluide varie en progression géométrique : l'excès de température variant lui-même en progression géométrique, si le rapport de la première progression est 2, celui de la seconde sera 2,35, quelle que soit la nature du gaz et sa force élastique, ou en d'autres termes, la quantité de chaleur perdue est proportionnelle à la différence de température élevée à la puissance 1,233. Cette loi est une conséquence évidente de la formule (B).

3me *Loi.* Le pouvoir refroidissant d'un gaz est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnel à une certaine puissance de la pression. Cette puissance est 0,45 pour l'air, 0,315 pour l'hydrogène, 0,517 pour l'acide carbonique, et 0,501 pour l'hydrogène carboné. La première partie de cette loi résulte évidemment de la seule inspection de la formule; les puissances de la pression relatives aux différens gaz, résultent d'un très-grand nombre d'observations.

4me *Loi.* Le pouvoir refroidissant d'un gaz varie avec sa température de telle manière que si le gaz peut se dilater et qu'il conserve toujours la même force élastique, le pouvoir refroidissant se trouvera autant diminué par la raréfaction du gaz qu'il est augmenté par son échauffement; de sorte qu'il ne dépend en définitif que de la tension. Cette loi résulte de ce que dans la formule (B) la pression seule du gaz existe.

Vitesses du refroidissement dans un gaz, en ayant égard et au rayonnement et au contact du gaz.

Les vitesses sont représentées par la formule

$$V = m a^{\theta} (a^{t} - 1) + n p^{c} t^{b}.$$

Cette formule est trop compliquée pour pouvoir être traduite en langage ordinaire.

368. *Réchauffement et Refroidissement des Corps solides.* Les lois que nous venons d'énoncer ne sont applicables, comme nous l'avons dit, qu'à des masses fluides, parce que dans ces corps la chaleur s'y propage avec une extrême facilité, par les mouvemens du fluide, et que l'on peut toujours considérer les masses fluides, du moins dans le plus grand nombre de circonstances, comme ayant à chaque instant la même température dans tous leurs points. Mais l'immobilité des différentes parties d'un corps solide ne permet à la chaleur de pénétrer dans l'intérieur des masses solides que par le rayonnement des molécules; ce qui établit nécessairement une inégalité de température pendant toute la durée du réchauffement ou du refroidissement. Cependant les lois précédentes sont applicables à tous les corps solides dont les masses sont très-petites.

On conçoit, d'après ce qui précède, combien les lois du refroidissement et du réchauffement des corps doivent être compliquées.

M. Fourrier, dans l'ouvrage que nous avons déjà cité, a déterminé toutes les circonstances du refroidissement et du réchauffement des corps solides, en partant de l'hypothèse que le rayonnement d'une molécule était proportionnel à la différence entre sa température et celle des molécules environnantes : cette proportionalité n'est point rigoureusement exacte; mais elle est très-approchée, lorsque ces différences de température n'excèdent pas 45 ou 50 degrés. Nous n'examinerons ici que les phénomènes généraux du refroidissement. Lorsqu'une masse solide de forme quelconque se refroidit dans un milieu à une température constante, il est évident que la température du corps ira en décroissant de la surface vers l'intérieur, mais que les différences de température iront en diminuant à mesure que le refroidissement fera des progrès, et que la température de tous les points de la masse finira par devenir uniforme et égale à celle du milieu environnant, après un temps plus ou moins long; c'est alors seulement que le refroidissement sera complet. Lorsqu'une masse solide à une température constante est entièrement plongée dans un milieu à une température plus élevée, il est encore évident que la température du corps ira en diminuant de la surface vers

l'intérieur du corps ; que ces différences iront en s'affaiblissant avec le temps, et qu'il arrivera nécessairement une époque à laquelle tous les points du corps auront une température égale à celle du milieu ambiant. Si un corps solide de forme quelconque est échauffé seulement sur une portion quelconque de sa surface, par un foyer constant, et que tout le reste de la surface soit plongé dans un milieu à une plus basse température, il est encore évident que les parties du corps qui sont au-delà de la surface échauffée directement, s'échaufferont par communication ; mais comme chacun des points de la surface se refroidit dans le milieu ambiant, et par rayonnement et par contact, il arrivera nécessairement pour chacun d'eux une époque où la quantité de chaleur qu'ils perdent par ce refroidissement sera égale à celle qu'ils recevront du foyer par communication ; alors la température de chaque point de la masse deviendra constante, et toute la chaleur émise par le foyer passera à travers le corps pour se répandre dans le milieu : dans cet état permanent, la température du corps ira nécessairement en décroissant depuis la partie de sa surface qui reçoit l'action du foyer.

Nous donnerons, comme exemple, un des cas les plus simples de la propagation de la chaleur. Dans le cas particulier d'une barre cylindrique droite A B (*fig.* 231), soumise par son extrémité A à un foyer constant de chaleur, on démontre que si la barre est suffisamment mince pour que dans chaque section perpendiculaire on puisse regarder la température comme uniforme, et suffisamment longue pour que l'influence du foyer ne se fasse pas sentir à son extrémité, en désignant par y la température à une distance x de l'extrémité, où est appliquée la chaleur, lorsque la température est devenue permanente pour chaque point, on a l'équation.

$$y = Y\,10^{-\frac{x}{M}\sqrt{\frac{b}{a}}}$$

Y étant la température de la source de chaleur, M le module des tables logarithmiques ordinaires, qui est égal à 2,302585, b la vitesse du refroidissement libre pour chaque point de la surface considérée isolément, et a une quantité qui dépend de la faculté conductrice du corps.

On peut vérifier cette formule en prenant une barre métallique A B (*fig.* 231), dont l'extrémité A est recourbée et plongée dans un creuset plein de mercure qu'on maintient en ébullition ; on pratique le long de la barre des cavités, que l'on remplit

de mercure, dans lequel plongent des thermomètres qui indiquent exactement la température des points correspondans, et qu'un écran $m\,n$ soustrait au rayonnement du foyer. Lorsque les thermomètres sont devenus stationnaires, on observe leur température, et on les compare aux valeurs de y déduites de la formule, en mettant à la place de x la distance des centres des thermomètres à l'extrémité de la barre échauffée. On détermine préalablement la quantité $\frac{b}{a}$ en mettant à la place de x et de y les nombres donnés par une observation.

Ces comparaisons ont été faites par M. Biot, qui a répété avec beaucoup de soin les expériences en question sur des barres de différens métaux, et il a trouvé un accord satisfaisant entre les températures indiquées par les thermomètres, et celles qui sont données par la formule.

369. La théorie du rayonnement et du refroidissement que nous avons établie, nous donne l'explication de plusieurs phénomènes remarquables sur lesquels on n'a eu pendant long-temps que des notions très-vagues.

370. *Explication de la Rosée, du Serein, de la Gelée blanche.* La rosée est une vapeur humide qui se dépose le matin sur la terre et sur les feuilles des plantes ; le serein est une humidité qui se précipite le soir ; la gelée blanche n'est que de la rosée qui a été assez refroidie pour se congeler. Ces vapeurs, qui se précipitent de l'atmosphère, ne sont sensibles que par un ciel calme et serein ; elles sont plus abondantes dans les lieux très-découverts, et moins dans ceux d'où l'on ne peut apercevoir qu'une partie de l'horizon. Dans les mêmes circonstances, ces vapeurs ne se précipitent pas également sur tous les corps ; ceux qui rayonnent facilement s'en recouvrent beaucoup plus que les autres, et si l'on fait l'expérience, par exemple, avec des plaques de verre qui ont un grand pouvoir émissif, et avec des plaques de métal poli qui en ont un très-faible, on trouve que ces plaques étant placées à côté les unes des autres, le soir ou le matin, celles de verre se recouvrent d'une grande quantité de vapeurs condensées, tandis que les plaques métalliques restent parfaitement sèches, et si on applique contre ces plaques un thermomètre très-sensible à réservoir plat, afin que la coïncidence ait lieu sur un plus grand nombre de points, on observe que les plaques couvertes de rosée sont à plusieurs degrés au-dessous de la température

de l'air, tandis que les autres sont sensiblement à la même température. Il est évident, dès lors, que la précipitation des vapeurs de l'atmosphère sur les différens corps, tient à leur refroidissement; d'après cela, il y a deux choses à examiner : 1° comment le refroidissement des corps peut produire cette précipitation de vapeurs; 2° comment il se fait que dans les circonstances qui accompagnent la rosée ou le serein, le refroidissement des corps sur lesquels les vapeurs se précipitent peut avoir lieu.

L'air, comme nous le verrons plus tard, tient toujours de l'eau en dissolution; mais la quantité qu'il peut en tenir dépend de la température : si l'air est saturé de vapeurs d'eau, le plus faible abaissement de température produit une précipitation de vapeurs; mais s'il ne l'est point complètement, il faudra, pour qu'il laisse précipiter une portion de ses vapeurs, un abaissement de température d'autant plus considérable qu'il en renferme moins. Quand il sera question des vapeurs, nous entrerons à cet égard dans beaucoup de détails; maintenant il suffit de démontrer ce fait par quelques exemples. Lorsque pendant l'été on met de l'eau froide dans un vase de verre, à l'instant la surface extérieure se couvre de petites gouttelettes d'eau : cette eau ne peut point provenir du liquide intérieur, car le verre est imperméable aux liquides; elle provient donc de l'air dont les couches qui sont en contact avec la surface du vase se trouvant refroidies, abandonnent, à l'état liquide, les vapeurs qu'elles ne peuvent plus tenir en dissolution; aussi, on observe que la quantité de vapeurs qui se précipitent est d'autant plus grande, que le liquide renfermé dans le vase est plus froid. Lorsqu'il existe une grande différence de température entre l'air extérieur et l'air intérieur d'un appartement, les vitres se couvrent en-dedans de vapeurs d'eau, et quand la température extérieure est au-dessous de celle de la congélation de l'eau, la vapeur déposée se congèle et cristallise en rameaux comme des feuilles de fougère : ce phénomène qui se renouvelle tous les jours, pendant l'hiver, ne peut évidemment pas avoir d'autres explications que celle que nous avons donnée plus haut; ainsi nous voyons clairement, et par les explications que nous avons données d'abord, et par les faits que nous venons de rapporter, que toutes les fois qu'un corps plus

froid que l'atmosphère sera exposé à l'air, pourvu que la différence de température soit suffisante, il se déposera toujours sur sa surface une couche plus ou moins épaisse de vapeurs.

Reste maintenant à connaître la cause du refroidissement. Les circonstances qui accompagnent la précipitation de la rosée indiquent d'elles-mêmes où réside cette cause ; en effet, il faut que l'air soit calme et l'horizon des objets étendu ; or, quelle est l'influence du ciel sur la température d'un corps ? Il reçoit les rayons calorifiques qui émanent du corps, et lui en renvoie peu ; car, le pouvoir rayonnant des gaz est très-faible, et d'ailleurs, pendant que le soleil est au-dessous de l'horizon, la température de l'air va en diminuant depuis la surface de la terre ; par conséquent, le rayonnement de chaque couche d'air, de bas en haut, n'est pas compensé par le rayonnement des couches supérieures de haut en bas ; l'air doit donc se refroidir en rayonnant de la chaleur vers l'espace planétaire qui ne lui en renvoie point, et par suite la portion de la terre qui est dans l'ombre doit se refroidir aussi. Voilà donc une cause bien évidente du refroidissement, et nous pouvons poser en principe que toutes les fois qu'un corps rayonne vers une grande partie de l'espace, il se refroidit constamment ; à la vérité, son contact avec les corps de la surface de la terre et le contact de l'air peuvent, dans un grand nombre de cas, lui restituer la chaleur qu'il perd par le rayonnement ; mais lorsque l'air est calme, le ciel pur, et que le corps rayonne facilement, sa température s'abaisse très-sensiblement.

On conçoit, d'après cela, que la rosée ne doit jamais se déposer quand le soleil est sur l'horizon, parce qu'il échauffe la surface de la terre, et que sa présence produit des courans d'air continuels ; qu'elle ne se dépose que dans les lieux bien découverts, parce que c'est le rayonnement vers le ciel qui produit le refroidissement, et qu'il faut que l'amplitude de ce rayonnement soit la plus grande possible ; qu'elle ne se dépose que sur les corps qui rayonnent facilement, parce que ce sont ceux qui se refroidissent le plus vite (1).

(1) L'explication de la rosée, que nous venons de donner, est due à M. Weels.

Les circonstances les plus avantageuses pour produire un grand refroidissement par le seul rayonnement d'un corps vers l'espace, seraient de le mettre au foyer d'un miroir parabolique ou d'un réflecteur sphérique dirigé verticalement, et de soutenir le miroir par des corps conduisant difficilement la chaleur; par exemple, de le poser sur de la laine, du crin ou de l'édredon. Par ce moyen le rayonnement total du corps se dirigerait vers le ciel, ou directement ou par la réflexion du miroir, et les corps de la surface de la terre ne lui restitueraient que difficilement la chaleur qu'il perdrait par le rayonnement; on obtiendrait ainsi un refroidissement considérable. Depuis un temps immémorial on fait au Bengale de la glace par un procédé analogue; on place des vases de terre non vernissés, à large ouverture et pleins d'eau, sur des monceaux de paille hachée, non comprimés, et si pendant la nuit le ciel est pur et l'air calme, le refroidissement s'élève jusqu'à la congélation de l'eau (1).

Nous avons déjà rapporté le fait de la précipitation des vapeurs contre les vitres des appartemens, par la différence de température des couches d'air qui baignent les deux surfaces du verre. M. Bénédict Prevost a fait à cet égard quelques observations qu'il est important de rappeler ici. Lorsque l'on couvre une partie de la vitre d'une feuille d'étain, si elle est placée du côté le plus chaud, il se dépose contre le métal plus de vapeurs que sur la partie de la vitre qui est découverte, et si au contraire la feuille d'étain est du côté de l'air froid, il ne se dépose presque point de vapeurs sur la partie de la vitre qui est opposée à la lame métallique; l'explication de ce phénomène se déduit facilement de ce qui précède. En effet, dans le premier cas la feuille métallique étant du côté de l'air chaud, n'empêche pas la vitre de se refroidir; elle accélère même le refroidis-

(1) M. Weels a exécuté, en Angleterre, pendant l'été, le procédé que l'on emploie dans l'Inde pour obtenir de la glace, et il a parfaitement réussi.

Mrs Pictet, Weels et Six ont observé que pendant les nuits sereines la température de l'air va en décroissant depuis la surface de la terre jusqu'à une certaine hauteur, à partir de laquelle la température commence à croître, de sorte qu'à 220 pieds la température est la même qu'à la surface. On ne connaît point l'explication de cette singulière anomalie. Elle fait voir pourquoi la rosée est plus abondante à la surface de la terre, et pourquoi un vent léger la fait souvent disparaître, en amenant à sa surface les couches supérieures de l'air qui sont plus chaudes.

sement de la partie contre laquelle elle est appliquée, car le métal poli réfléchissant beaucoup, renvoie dans l'air chaud les rayons de chaleur qui en sortent, et qui pénètrent au contraire facilement dans la vitre découverte, ce qui retarde ou diminue d'autant son refroidissement; il en résulte que la vapeur doit se déposer plus tôt et en plus grande quantité contre le métal. Dans le second cas, il est évident qu'elle empêche la vitre de se refroidir par son peu de pouvoir rayonnant, et par conséquent il doit moins se déposer de vapeurs sur la partie de la vitre qui lui est opposée, que sur les parties nues.

371. *Refroidissement séculaire de la terre.* La température de la terre en un point quelconque de sa masse dépend de deux causes : 1° De la chaleur rayonnée par le soleil; 2° de la chaleur centrale de la terre : l'action de la première est évidente, l'existence de la seconde a besoin d'être démontrée.

Il y a quelques années, l'on n'avait sur la chaleur centrale de la terre que des probabilités, encore reposaient-elles principalement sur les phénomènes volcaniques, qui semblent ne pouvoir être expliqués qu'en admettant un foyer central de chaleur, et sur l'aplatissement de la terre, qui, différant peu de ce qu'il aurait été nécessairement par suite de sa révolution diurne, si elle avait été primitivement liquide, rendrait probable cet état primitif; et comme un grand nombre de phénomènes géologiques s'expliquent mieux en admettant une liquidité ignée, qu'une liquidité aqueuse, on regardait comme très-probable que, lors de sa formation, la terre avait eu une liquidité ignée, durant laquelle elle avait pris son aplatissement, et que refroidie ensuite pendant les siècles qui se sont écoulés, sa chaleur initiale ne subsistait plus qu'en partie et à de grandes profondeurs au-dessous de sa surface. Mais depuis quelque temps des expériences nombreuses démontrent que la température est constante pour un même lieu à une petite distance au-dessous de la surface du globe, et qu'elle va en croissant à mesure que l'on descend à de plus grandes profondeurs, ce qui ne pourrait pas exister si la terre n'avait eu originairement une température plus élevée; car si elle ne devait sa chaleur qu'aux rayons solaires, au-delà de la profondeur où se manifestent les variations diurnes et annuelles du soleil, la température aurait dû être décroissante en s'approchant du centre, jusqu'à l'époque à laquelle l'action solaire aurait produit tout son effet, après quoi la la température de toute la masse de la terre serait demeurée constante. L'existence de la chaleur centrale de la terre n'est donc plus un problème; mais ce qui en est un encore, c'est l'intensité de la température à des profondeurs auxquelles on n'a pas pénétré. Un jour, peut-être, un plus grand nombre d'expériences accumulées fourniront le moyen de connaître la loi de décroissement sur l'étendue

accessible d'une même verticale, et l'on pourra alors arriver par le calcul à trouver la température jusqu'au centre de la terre.

Les deux causes qui influent sur la température de la terre agissent très-inégalement. L'action solaire produit sur une couche peu profonde de la surface, des variations de températures périodiques, diurnes ou annuelles ; les premières occasionnent les différences de températures du jour et de la nuit, les autres, celles des saisons. La chaleur solaire qui dépasse la couche où se manifestent les variations périodiques, traverse la terre de chaque côté de l'équateur et se dissipe dans l'atmosphère par les régions polaires : ce flux continuel de chaleur n'apporte aucun changement dans la température des parties de la terre qu'elle parcourt. La chaleur centrale en se propageant de couche en couche, jusque dans l'atmosphère, établit une différence de température décroissante depuis le centre de la terre jusqu'à sa surface; ces différences diminuent avec le temps, et il existera certainement une époque à laquelle elles auront complètement disparu, et où les températures de toutes les parties de la terre deviendront égales ; mais cette époque est excessivement éloignée, car le refroidissement du globe est très-lent ; il est de moins de $\frac{1}{57600}$ de degré centésimal pour un siècle.

Indépendamment des causes générales qui produisent les variations de température, il en est de particulières à chaque lieu, qui ont une grande influence; telles sont la hauteur du sol, sa configuration, sa nature, la position et l'étendue des eaux, les vents, etc.

§ II.

Calorique Latent.

372. La calorique qui pénètre un corps produit deux effets distincts, il en élève la température et il en écarte les molécules ; on peut considérer ces deux effets comme provenant chacun d'une partie du calorique reçu par le corps, dont l'une produirait à elle seule l'élévation de température, l'autre les variations de distance des molécules. Cette première portion du calorique d'un corps a été désignée sous le nom de *calorique sensible* ; nous nommerons la seconde *calorique latent.* Ainsi le calorique latent d'un corps est la portion de son calorique, qui est uniquement employée à produire les phénomènes intestins indépendans de la température.

373. Nous examinerons d'abord la dilatation des corps dans leurs divers états, puis les vapeurs que les liquides émettent toujours, ensuite le rapport dans lequel se trouvent le calorique sensible et le caloriqne latent dans les différens corps, et enfin les phénomènes qui accompagnent les changemens d'état des corps.

A. *Dilatation des Corps.*

374. La dilatation des corps solides se manifeste d'une manière si évidente, dans un si grand nombre de circonstances, qu'il ne serait pas nécessaire de rapporter ici les expériences qni constatent ce phénomène ; cependant nous décrirons l'appareil qu'on emploie ordinairement pour mettre en évidence cette dilatation. AB (fig. 232) est une barre de fer fixée sur un support PQ ; vers l'extrémité B, est placé un arrêt fixe C, et vers l'extrémité A, une barre verticale fixe DE, à la partie supérieure de laquelle se trouve une portion de cercle en cuivre EF : une aiguille GH mobile autour du point O, parcourt par son extrémité supérieure C les degrés de EF, et l'autre extrémité, recourbée, s'applique contre l'extrémité d'une barre métallique MN, qu'on peut enlever et replacer au moyen des anneaux *m* et *n*. Pour démontrer, au moyen de cet appareil, la dilatation des métaux, on commence par appliquer la barre MN contre l'arrêt C, et l'extrémité H de l'aiguille contre l'autre extrémité de la barre, et on observe sur le cadran E, la position de la pointe G de l'aiguille ; ensuite on enlève la barre, on la fait chauffer et on la place de manière que l'arrêt C et le bouton de l'aiguille la touchent exactement à ses deux bouts, et on observe la position de l'extrémité G de l'aiguille : pour peu que la barre ait été chauffée, on reconnaît que l'aiguille s'est avancée dans le sens EF, par conséquent que la barre MN s'est alongée : il est évident que si OG est dix fois plus grand que OH, l'espace décrit par le point G sera dix fois plus grand que l'alongement de la barre, et qu'en général l'espace décrit par le point G sera égal à la dilatation de la barre, multiplié par le rapport des longueurs des deux portions OG et OH de l'aiguille ; en augmentant ce rapport, on peut donc rendre sensible la plus

légère dilatation. Il semble au premier coup d'œil que cet appareil pourrait servir non-seulement à constater le fait de la dilatation, mais encore à mesurer cet effet; cependant il renferme une cause d'erreur qui rendrait les résultats tout-à-fait incertains, quelle que soit d'ailleurs la perfection de l'appareil et la précision des expériences; cette cause réside dans le contact de la barre avec le support MN : elle lui communique nécessairement une portion de sa chaleur, sa température baisse, sa dilatation diminue par conséquent; et la chaleur qu'elle a cédée au support le dilatant, les indications de l'aiguille sont diminuées de toute cette dilatation.

Cependant comme la connaissance de la dilatation des corps est d'une grande importance dans presque tous les arts, il était essentiel d'en connaître exactement la mesure. Mrs de Laplace et Lavoisier sont parvenus à la déterminer avec une grande précision au moyen de l'appareil que nous allons décrire.

M, N, M', N' (*fig.* 233) sont quatre dés en pierre de taille, solidement assis sur de fortes fondations; entre ces quatre masses solides se trouve un fourneau RS supportant un bain en cuivre GH; c'est dans ce bain que l'on dépose les barres XY dont on veut déterminer les dilatations; elles sont soutenues dans le bain par des tourrillons *g*, supportés par des lames de glace *f* fixées à des barres horizontales qui s'appuyent sur les dés de pierre. La barre métallique dont on veut mesurer la dilatation s'appuie par une extrémité contre une bande de glace épaisse FB parfaitement immobile, et l'autre extrémité est en contact avec une glace semblable CA, mobile autour de l'axe CC; à l'extrémité de cet axe est placé un bras de lévier CL, qui s'appuie sur une lunette OO', dans l'intérieur de laquelle se trouve un fil horizontal; à une distance de 100m, est fixée une *mire* verticale divisée en pouces et en lignes. On commençait par remplir l'auge de glace fondante, on y plaçait la barre, on l'appliquait contre les deux tiges de verre FB et CA, on observait la division de la mire qui se trouvait sur la direction du fil horizontal de la lunette, après quoi on remplissait l'auge d'eau bouillante, dont la température était déterminée par plusieurs thermomètres placés horizontalement à la hauteur occupée par la barre; on observait de nouveau la position du fil

de la lunette sur la mire : l'espace parcouru sur la mire par le fil, était la dilatation apparente ; pour en déduire la dilatation réelle il fallait la diviser par un nombre constant qu'on avait déterminé d'avance par des expériences directes ; ce nombre, dans l'appareil de Mrs de Laplace et Lavoisier, était 744.

DILATATION linéaire du Verre et des Métaux,
par Mrs de Laplace *et* Lavoisier.

NOMS DES SUBSTANCES.	DILATATION pour 1° du thermomètre centigrade.	NOMS DES SUBSTANCES.	DILATATION pour 1° du thermomètre centigrade.
Glace de Saint-Gobin..........	$\frac{1}{112047}$	Plomb..........................	$\frac{1}{35108}$
Tube de verre sans plomb........	$\frac{1}{114191}$	Étain des Indes.................	$\frac{1}{51609}$
Flint glass anglais..............	$\frac{1}{124814}$	Étain de Falmouth..............	$\frac{1}{46161}$
Verre de France avec plomb.....	$\frac{1}{114680}$	Argent de coupelle..............	$\frac{1}{52363}$
Cuivre rouge......................	$\frac{1}{58057}$	Argent au titre de Paris.........	$\frac{1}{52392}$
Cuivre jaune......................	$\frac{1}{53523}$	Or de départ....................	$\frac{1}{68205}$
Fer doux forgé....................	$\frac{1}{81937}$	Or au titre de Paris non recuit.....	$\frac{1}{64451}$
Fer rond passé à la filière........	$\frac{1}{81153}$	Or au titre de Paris recuit........	$\frac{1}{66067}$
Acier trempé jaune, recuit à 30..	$\frac{1}{73048}$	Platine (suivant Borda).........	$\frac{1}{116748}$
Id. *id.* recuit à 65..	$\frac{1}{80674}$		

375. Mrs de Laplace et Lavoisier ont reconnu que les dilatations d'un même corps étaient uniformes de 0 à 100°, c'est-à-dire, que pour un même nombre de degrés compris dans ces limites, la longueur des barres augmentait d'une même fraction de leur longueur primitive.

Cependant Mrs Petit et Dulong ont trouvé que, pour un même nombre de degrés, la dilatation croissait avec la température, à la vérité, d'une manière inappréciable dans les limites de 0 et 100° ; mais de 0 à 300°, les accroissemens sont très-sensibles.

376. *Usage de la dilatation des corps.* Lorsqu'on connaît une des dimensions d'un corps à zéro, et que l'on veut trouver l'augmentation de longueur de cette dimension,

correspondante à une température quelconque, il est évident qu'il faudra pour cela multiplier la longueur du corps par la dilatation linéaire qui se trouve dans la table et par la température, puisque les nombres de la table sont les dilatatiuns correspondantes à 1° du thermomètre: ainsi en désignant par a la longueur d'une barre à 0°, par b sa longueur à la température t°, et par d la dilatation pour 1°, et pour l'unité des longueurs ; on aura évidemment $b = a + adt$, ou $b = a(1 + dt)$, d'où l'on tire $a = \frac{b}{1+dt}$. Ces deux formules serviront à résuudre tous les problèmes que l'on peut se proposer sur la dilatation des corps. La table que nous venons de rapporter ne donne que la dilatation dans une seule dimension, on peut facilement en déduire l'augmentation du volume ; on a trouvé par le calcul que la dilatation cubique est égale à trois fois la dilatation linéaire.

En effet, concevons un corps de forme quelconque dont V soit le volume : supposons que soumis à une température plus élevée de t degrés, son volume devienne V'; le corps sous ces deux volumes aura des formes semblables, et comme dans les corps semblables les volumes sont entre eux comme les cubes de leurs dimensions homologues, on aura, en désignant par l et l', deux dimensions correspondantes, $\frac{V}{V'} = \frac{l^3}{l'^3}$, d'où $\frac{V'-V}{V} = \frac{l'^3 - l^3}{l^3} = \frac{(l'^2 + ll' + l^2)(l'-l)}{l^3}$. Or, comme l' diffère peu de l, le carré de leur différence peut être négligé, et nous pouvons faire $l' = l$ dans le premier facteur $(l'^2 + ll' + l^2)$; alors il viendra $\frac{V'-V}{V} = \frac{3l^2(l'-l)}{l^3} = 3\frac{l'-l}{l}$.

Or, $\frac{V'-V}{V}$ est la dilatation cubique pour l'unité de volume, et $\frac{l'-l}{l}$ est la dilatation linéaire pour l'unité de longueur ; donc en nommant Δ la première dilatation et d la seconde, nous aurons

$$\Delta = 3d.$$

d est alors égal à la dilatation pour un degré multiplié par la température t. Le volume après la dilatation sera par conséquent

$$V' = V + 3d.$$

La dilatation des corps solides, quoique très-petite en elle-même, produit, sur des barres très-longues, des variations considérables, et dans un grand nombre de cas il est indispensable d'y avoir égard ; nous en citerons quelques exemples.

Les tuyaux de fonte destinés à la conduite des eaux éprouvent, par les vicissitudes de température des saisons, des variations de longueur considérables, et qui souvent sont telles que si on ne les avait pas prévues dans leur construction, elles les briseraient infailliblement ; car la force avec laquelle les corps solides tendent à changer de volume par les changemens

de température, est irrésistible, et comme la fonte est peu flexible, si la série des tuyaux ne pouvait développer ses variations de longueur, elle se briserait. Pour prévenir cet accident, les cylindres s'emboîtent à frottement de manière à ce qu'il y ait le jeu nécessaire pour que les variations de température n'aient d'autre effet que de faire entrer ou sortir plus ou moins les tuyaux les uns dans les autres.

Dans les horloges à pendule, la tige qui suspend la lentille, soumise aux variations de température de l'atmosphère, change à chaque instant de longueur, et trouble la régularité des mouvemens de l'horloge, qui retarde lorsque la température augmente et avance lorsqu'elle diminue : pour obvier à ces irrégularités, qui à la vérité sont fort peu importantes dans nos besoins journaliers, mais qui le sont beaucoup dans les observations astronomiques, on emploie différens moyens dont nous allons décrire les principaux.

Le compensateur le plus simple consiste (*fig.* 234) en une tige de fer MN, à l'extrémité de laquelle se trouve un cylindre de verre fermé et plein de mercure qui sert de lentille. Lorsque la tige du pendule s'alonge par l'augmentation de température, le mercure se dilate et monte dans le cylindre ; le premier effet abaisse le centre de gravité, le second l'élève, et comme le mercure se dilate plus que le cuivre, on peut toujours donner au cylindre de verre des dimensions telles que ces deux effets se compensent exactement.

Les compensateurs les plus usités ont la forme indiquée par la figure 235; la verge FG de la lentille est suspendue à un châssis en cuivre *fe ef*, qui repose par sa partie inférieure sur un autre châssis en fer *cd dc* ; ce dernier est fixé à la partie supérieure d'un autre châssis en cuivre *ab ba*, qui lui-même est posé sur la traverse inférieure d'un grand cadre en fer ABCD. Il résulte de là que tous les cadres en fer tendent à faire descendre la lentille, tandis que tous ceux qui sont en cuivre tendent à la remonter. Ainsi en appelant D la dilatation des tiges OE et FG, B la somme des dilatations d'une des tringles verticales de chaque châssis de cuivre, et C la même somme pour les châssis de fer, la descente de la lentille sera $D+C-B$. Et comme le cuivre se dilate plus que le

fer, on peut toujours déterminer les longueurs relatives des tiges de fer et de cuivre, de manière à ce que la lentille reste à la même hauteur.

Une autre espèce de compensateur consiste (*fig.* 236) en deux tringles, l'une de fer AB, l'autre de cuivre CD, superposées et fixées par un grand nombre de boulons à vis : cet appareil est attaché d'une manière invariable à la tige du pendule. Lorsque la température baisse, le centre de gravité G du pendule remonte ; mais la barre de cuivre CD se contractant plus que la barre de fer AB, et cette dernière ne pouvant pas glisser sur la première, leur système se courbe vers le bas. Et comme le centre de gravité du pendule est le centre de gravité de la masse totale de l'appareil, ce mouvement fait descendre le centre de gravité des deux tringles, et par conséquent celui du pendule : lorsque la température s'élève, les tringles se courbent en sens contraire (*fig.* 238), et le centre de gravité du pendule qui est descendu par l'alongement de la tige du pendule, remonte par la courbure des tringles. On peut facilement déterminer par le calcul les dimensions des tringles AB et CD, ainsi que leur position sur la tige, pour que la compensation soit exacte ; on corrige ensuite les petites erreurs que l'on peut commettre au moyen des deux boules à vis *m* et *n*, que l'on peut approcher ou éloigner à volonté des extrémités des tringles.

Cet appareil est employé dans les montres marines pour corriger les variations de force élastique des ressorts qui proviennent des changemens de température.

377. *Force de contraction ou de dilatation des corps solides par l'action de la chaleur.* La force avec laquelle les corps tendent à changer de volume par la variation de température, est extrêmement grande ; on n'a pas encore pu la vaincre par les moyens qui sont à notre disposition. M. Molard, ancien directeur du Musée des Arts et Métiers, a fait de cette force une très-heureuse application ; nous allons la rapporter. Dans l'établissement des Arts et Métiers, deux murailles latérales d'une galerie s'étaient inclinées par le poids d'un plafond qu'elles soutenaient : pour les rapprocher, M. Molard imagina de les faire traverser par des barres de fer, terminées en dehors par de forts boulons : en serrant les écrous on pouvait retenir les murailles, empêcher un plus fort écartement ; mais il était impossible,

quelque force que l'on employât, de les faire revenir ; alors on chauffa la moitié des barres par des lampes que l'on suspendait au-dessous, de manière que les barres chaudes et froides alternaient. Les barres chaudes s'étant alongées, on put serrer de nouveau les écrous ; on laissa ensuite refroidir les barres ; le retrait qu'elles éprouvèrent ramena les murailles d'une partie de leur écart, et en réitérant cette opération on parvint à faire disparaître toute l'inclinaison primitive.

378. *Dilatation des corps liquides.* Les liquides, de même que les corps solides, se dilatent et se contractent par l'élévation ou l'abaissement de leur température ; c'est sur ce phénomène que sont fondés tous les thermomètres.

379. Pour étudier les lois de la dilatation des liquides, l'appareil le plus simple consiste (*fig.* 239) en un tube capillaire A B, terminé par une boule C d'un grand diamètre. Le tube, exactement calibré, doit être divisé en degrés dont la capacité, relativement à celle de la boule, soit connue (1). On remplit la boule du liquide dont on veut mesurer la dilatation (2). On porte l'instrument dans un bain dont on connaît la tem-

(1) Pour graduer l'instrument, on commence par s'assurer que le tube capillaire A B est exactement cylindrique ; on y introduit une bulle de mercure et on la promène dans toute sa longueur ; il faut que dans toutes ses positions elle occupe exactement le même espace. Lorsque cette condition est satisfaite, on la divise sur sa longueur en parties égales, qui ont alors évidemment la même capacité ; mais si la bulle de mercure n'occupe pas dans toute l'étendue du tube la même longueur, on peut être assuré que ce tube n'est pas parfaitement cylindrique ; alors, pour le diviser en parties d'égale capacité, on emploie une méthode que nous expliquerons lorsque nous parlerons de la construction des thermomètres. Le tube A B étant divisé en degrés égaux, on parvient facilement à déterminer le rapport de leur capacité à celle de la boule par la méthode suivante. On pèse le tube vide, on le remplit de mercure jusqu'à la première division du tube ; on le pèse de nouveau ; la différence des poids donne évidemment celui du mercure ; on ajoute alors une nouvelle quantité de mercure, de manière que le métal occupe plusieurs divisions du tube ; on trouve, comme précédemment, le poids du métal, et en retranchant de ce poids celui du métal que l'on avait mis d'abord, cette différence donne celui du mercure, qui occupe dans la dernière opération les degrés du tube qui ont été remplis ; en divisant ce poids par celui des degrés et le quotient par le poids du mercure que contenait la boule, il est évident que ce dernier quotient sera le rapport du volume d'un degré à celui de la boule.

(2) Pour remplir la boule, on ne peut pas verser le liquide par le tube A B, car la boule ne peut se remplir d'un liquide quelconque qu'autant que l'air peut s'en dégager. Or, comme le tube A B est capillaire, la colonne liquide ne pourra pas se diviser de manière à laisser remonter l'air ; par conséquent, le liquide ne descendra pas. Pour parvenir à remplir la boule, voici le moyen qu'on



pérature ; le liquide dilaté monte dans le tube, et on calcule par le nombre de degrés dont il s'élève, de quelle fraction de son volume il s'est dilaté.

Cette manière d'opérer exige un grand nombre de précautions et de corrections, sans lesquelles les résultats que l'on obtiendrait seraient très-inexacts : 1° Il faut d'abord fermer à la lampe l'extrémité du tube, attendu que les liquides, comme nous le verrons plus tard, donnent naissance à des vapeurs à toutes les températures, vapeurs qui diminueraient à chaque instant le volume du liquide ; 2° avant les observations il faut, par une ébullition suffisamment prolongée, purger le liquide de tout l'air qu'il peut contenir, car l'air ne se dégageant pas de suite du liquide et se dilatant plus que lui, produirait de grandes anomalies dans la dilatation apparente du liquide ; 3° il faut corriger la dilatation apparente du liquide de l'augmentation de volume de la boule de verre.

Pour déterminer la formule de cette dernière correction, représentons par V le nombre de degrés occupés par le liquide tant dans la boule que dans le tube du liquide à la température initiale ; par V', le nombre de degrés à une température de t degrés plus élevée que la première. Il est évident que le verre s'étant dilaté, chaque degré est plus grand qu'à la température initiale d'une certaine quantité. Or, en appelant K la dilatation cubique du verre, chaque degré reçoit un accroissement de valeur égale à Kt ; par conséquent, le volume réel est $V'(1 + Kt)$.

On pourrait encore mesurer la dilatation des corps liquides en déterminant le poids d'un même volume à différentes températures ; car il serait alors facile de déterminer dans chaque cas le volume que devrait avoir le liquide, pour que son poids ne fût point changé. Par exemple, un litre d'eau pure à 4° pèse 1 k. ; si on avait reconnu que 1 k. d'eau à 50° pèse 980 g, on ferait la proportion $0,980 : 1 :: 1, : x$ d'où

emploie : on fait chauffer la boule, et on plonge rapidement l'extrémité A du tube AB (*fig.* 240) dans un vase qui contient le liquide que l'on veut faire passer dans la boule ; à mesure qu'elle se refroidit, l'air qui y est renfermé perd de sa force élastique, et la pression de l'air fait monter une certaine quantité de liquide ; à la fin du refroidissement la quantité de liquide qui s'est introduit est égale au volume de gas qui a été expulsé de la boule par la dilatation. Une fois parvenu à avoir dans la boule une certaine quantité de liquide, on le fait bouillir ; ses vapeurs chassent le reste de l'air qui y est renfermé, et en plongeant encore subitement l'extrémité A du tube capillaire dans le vase plein de liquide, la boule finit par se remplir.

l'on tirerait $x = 1,02$; ainsi dans le passage de 4° à 50, l'eau augmenterait de $^{2}/_{100}$ de son volume ; la dilatation linéaire serait le $^{1}/_{3}$ de cette quantité. On peut obtenir le poids d'un même volume de liquide à différentes températures de plusieurs manières, 1° en se servant d'un vase A (*fig.* 241) dont l'ouverture usée à l'émeri est fermée par un plateau de verre M, qui s'applique exactement sur les bords de l'ouverture ; il est évident que par ce moyen on pourra toujours remplir exactement le vase, et que le liquide qu'il contiendra à différentes températures aura toujours le même volume, ce qui ne serait pas si le vase se fermait par un bouchon, car on pourrait l'enfoncer plus ou moins ; 2° au moyen d'un petit ballon (*fig.* 242) terminé par un orifice capillaire *o* : on commence par le remplir exactement de liquide à la plus basse température, on détermine le poids du liquide qu'il renferme, ensuite on le met dans des bains à des températures croissantes ; le liquide se dilate, une partie s'échappe par l'ouverture *o* : il est évident que la dilatation est égale au volume de liquide qui s'est écoulé ; on détermine ce volume en comparant son poids à celui qui reste dans le ballon. Dans ces deux modes d'opérations, on sent qu'il faut corriger les poids de la dilatation du vase.

On peut, pour déterminer la mesure de la dilatation des liquides, employer un autre principe qui permet une approximation beaucoup plus grande, attendu que les observations ne doivent éprouver aucune correction. Soit A B C D (*fig.* 243) un tube deux fois recourbé et ouvert par ses deux extrémités ; nous avons vu qu'un même liquide devait s'y maintenir à des hauteurs parfaitement égales, et que si les deux branches A B et C D renfermaient des liquides d'inégales densités, les hauteurs des liquides devaient être dans l'état d'équilibre en raison inverse de leur densité, et cela quels que soient les diamètres relatifs des deux branches verticales et les inégalités de chacune d'elles, pourvu que les tubes à la hauteur des niveaux ne soient point capillaires ; cela posé, voici l'appareil dont il est question. A B C D (*fig.* 244) est un siphon renversé dont les deux branches verticales sont terminées par des tubes d'un grand diamètre, et dont la branche inférieure B C, très-capillaire, est parfaitement horizontale ; chacune des deux branches est enveloppée d'un manchon de verre mastiqué sur le plateau MN. On remplit le tube A B C D du liquide dont on veut déterminer la dilatation. Tant que les deux branches A B et C D sont à la même température, les niveaux restent à la même hauteur ; mais si on soumet les deux colonnes liquides à des températures différentes en remplissant les deux cylindres *m* et *n*

de liquides inégalement échauffés, les niveaux ne resteront pas les mêmes, et la différence de leur hauteur sera la dilatation linéaire correspondante à la différence de température et à la hauteur de la colonne, à partir du centre du tube horizontal B C. Pour mesurer et la hauteur absolue de la colonne dilatée et les différences des niveaux, on se sert d'une lunette G H (*fig.* 245) garnie d'un fil horizontal et qui peut se mouvoir parallèlement à elle-même sur une tige verticale K L, divisée avec beaucoup de soin ; on place la lunette à égale distance des deux branches A B et C D, et en la disposant de manière que le fil horizontal corresponde successivement aux deux niveaux: il est évident que l'espace parcouru par la lunette sur sa tige sera la différence des niveaux. Quant à la hauteur absolue, on commence par placer verticalement contre la colonne A B une tige métallique divisée en centimètres et en millimètres, après quoi on descend la lunette horizontale en un point déterminé de son support vertical. On observe à quelle division de la tige correspond le fil de la lunette, on obtient ainsi la distance du plateau M N à la hauteur du fil de la lunette ; en retranchant de cette hauteur la moitié du diamètre extérieur du tube horizontal B C, et y ajoutant le chemin vertical de la lunette jusqu'à ce que le fil devienne tangent à la surface du liquide, il est évident que l'on obtiendra la hauteur absolue de la colonne.

380. On a reconnu par l'observation, 1° que la dilatation des liquides pour un même nombre de degrés du thermomètre, croît avec la température ; 2° que cet accroissement n'est pas proportionnel à la température ; 3° que dans les températures voisines de celles qui correspondent à leur changement d'état, à leur vaporation ou à leur congélation, les liquides éprouvent de fortes anomalies dans leur dilatation ou leur contraction.

381. M. Biot a trouvé, en comparant un grand nombre d'observations faites par Deluc, que la dilatation des liquides pouvait être représentée par la formule $d = at + bt^2 + ct^3$. d étant la dilatation de $o°$ à $t°$, a, b, c, des coefficiens qui sont constans pour un même liquide, et que l'on détermine pour chacun d'eux, en faisant satisfaire l'équation à trois observations.

Pour faire voir les variations de dilatation des liquides à mesure que leur température s'élève, nous rapporterons ici un tableau de la dilatation de différens liquides de 10 en 10 degrés du thermomètre de Réaumur, d'après Deluc. Deluc avait observé simultanément des thermomètres construits avec différens liquides ; les nombres que nous rapportons sont les degrés de ces instrumens parcourus par une élévation de température

de 10° du thermomètre à mercure. Ces nombres ne donnent pas les dilatations absolues, car il aurait fallu, pour les obtenir, connaître le rapport entre les degrés de ces instrumens et les volumes des liquides renfermés dans les thermomètres, rapport que Deluc n'a point déterminé.

Tableau de la dilatation de plusieurs liquides de 10 *en* 10 *degrés du thermomètre, divisé en* 80 *parties ou degrés.*

TEMPÉRATURE.	EAU PURE privée d'air.	ALCOOL rectifié.	HUILE d'olive.	HUILE essentielle de camomille.	EAU SATURÉE de muriate de soude.
0° à 10°	0,2	7,9	9,5	9,3	8,4
10° à 20°	3,06	8,6	9,8	9,6	8,9
20° à 30°	6,7	9,1	10,	9,8	9,2
30° à 40°	9,5	9,5	9,9	7,9	9,8
40° à 50°	12,	10,2	10,	12,2	10,3
50° à 60°	14,2	10,9	10,1	10,3	10,5
60° à 70°	16,1	11,6	10.1	10,4	11,3
70° à 80°	17,7	12,2	10,6	10,5	11,6

On voit, à l'inspection de ce tableau, que les dilatations de l'eau croissent très-rapidement; que celles de l'alcool rectifié sont aussi croissantes, mais d'une manière moins rapide, de même que l'eau saturée de sulfate de soude; et que l'huile d'olive, ainsi que l'huile essentielle de camomille, n'éprouve que de très-légères variations.

Nous verrons plus tard que les dilatations du mercure sont sensiblement uniformes, du moins de 0° à 100°.

Comme la connaissance des dilatations absolues des liquides les plus en usage est très-utile dans un grand nombre de recherches physiques, telles que la détermination des densités des corps solides et liquides, nous donnerons le tableau de la dilatation absolue des liquides les plus importans.

TABLEAU de la dilatation de plusieurs liquides de 0° à 100°, le volume initial étant 1.

NOMS DES SUBSTANCES.	DILATATION de 0° à 100.
Acide hydro-chlorique. (Pesanteur spécifique 1,137)	0,0600.
Acide nitrique........ (Pesanteur spécifique 1,40)	0,1100.
Acide sulfurique...... (Pesanteur spécifique 1,85)	0,0600.
Alcool	0,1100.
Eau	0,0466.
Eau saturée de sel commun	0,0500.
Ether sulfurique	0,0700
Huiles fines	0,0800
Huile de térébenthine	0,0700.
Mercure de 0° à 100	0,0180180.
Id. de 100 à 200	0,0184331.
Id. de 200 à 300	0,0188679.

TABLEAU de la contraction de plusieurs liquides de 5 en 5 degrés centigrades ; en représentant par 1000 leur volume à la température de leur ébullition. L'ébullition de l'eau est à 100°, celle de l'alcool à 78°,41, celle du sulfure de carbone à 46,60, et celle de l'éther à 35,66.

TEMPÉRATURE.	EAU.	ALCOOL.	SULFURE, DE CARBONE.	ÉTHER SULFURIQUE.
De 75 à 70.	36,76.	80,11.		
De 70 à 65.	35,47.	75,48.		
De 65 à 60.	34,02.	70,74.		
De 60 à 55.	32,42.	65,96.	66,21.	
De 55 à 50.	30,60.	61.01.	61,14.	78,38.
De 50 à 45.	28,56.	56,02.	56,28.	72,01.
De 45 à 40.	26,50.	50,85.	51,08.	65,48.
De 40 à 35.	24,10.	45,68.	45,77.	58,77.
De 35 à 30.	21.52.	40,28.	40,48.	52,06.
De 30 à 25.	18,85.	34.74.	35,06.	46,42.
De 25 à 20.	16,06.	29.15.	29.65.	39,14.
De 20 à 15.	13,15.	24,34.	23,80.	31,83.
De 15 à 10.	10,50.	17,51.	17,98.	24,16.
De 10 à 5.	6,61.	11,43.	12,01.	16,17.
De 5 à 0.	3,34.	5,55.	6,14.	8,15.

382. *Dilatation des corps gazeux.* Pour reconnaître le fait de la dilatation des corps gazeux et en déterminer la quantité, on se sert d'un appareil semblable à celui que nous avons décrit pour faire les expériences analogues sur les liquides.

On prend un tube A B (*fig.* 246), divisé en parties d'égale capacité, et terminé par une boule C, dont on connaît le volume par rapport à ceux des degrés du tube ; on remplit la boule et le tube de mercure qu'on y fait bouillir ; afin de chasser toute l'humidité que le tube pouvait contenir : cette précaution est indispensable, parce que l'eau se réduisant en vapeurs à toutes les températures, la force élastique de ces vapeurs s'ajouterait à celle du gaz qu'on renfermerait dans le tube et occasionnerait de très-grandes erreurs. Après une ébullition long-temps prolongée du mercure dans le tube, on adapte à son extrémité (*fig.* 247) un cylindre de verre rempli de fragmens d'une substance très-déliquescente, telle que du chlorure de calcium, et à l'extrémité de ce cylindre, un ballon à robinet renfermant le gaz dont on veut mesurer la dilatation. Au moyen d'une machine pneumatique mise en communication avec le cylindre M, on y fait le vide, puis en ouvrant le robinet *n*, le cylindre M se remplit du gaz qui était renfermé dans le ballon N. Alors on enlève ce ballon, et au moyen d'une petite tige de fer qui passe dans le tube A B à travers le cylindre M, et en agitant convenablement l'appareil, on fait tomber dans le cylindre M le mercure renfermé dans la boule et le tube, et le gaz que contient ce cylindre, complètement desséché par le chlorure de calcium, s'introduit dans le tube et dans la boule ; on opère de manière qu'il ne reste dans le tube A B qu'une très-petite bulle de mercure qui sert à séparer le gaz intérieur de l'air atmosphérique. Il ne s'agit plus alors que de porter l'appareil dans des bains à différentes températures, et d'observer la dilatation par les mouvemens de la petite bulle de mercure. Pour cela M. Gay-Lussac a employé une caisse de fer-blanc MNPQ (*fig.* 248) remplie d'eau, dont on élève à volonté la température par un foyer inférieur : à la partie supérieure se trouvent trois tubulures ; les deux extrêmes E et F sont destinées à laisser dégager la vapeur qui se forme dans la caisse ; celle du milieu reçoit un thermomètre dont le réservoir plonge dans le bain ; enfin, deux faces latérales

opposées sont garnies chacune d'une tubulure, au moyen de laquelle on introduit, dans une position horizontale, le tube renfermant le gaz que l'on veut soumettre à l'observation, et un thermomètre qui étant plongé dans la même couche liquide que le tube contenant le gaz, indique à chaque instant la température à laquelle il est soumis. Les tubes entrent à frottement dans des bouchons troués, afin que l'on puisse les retirer à volonté pour reconnaître la position de l'extrémité de la colonne de mercure dans le thermomètre, et celle de l'index dans le tube. Pour déduire les dilatations réelles des gaz, des dilatations apparentes observées au moyen de l'appareil que nous venons de décrire, il faut ajouter à cette dilatation apparente celle du verre; on emploie pour cela la formule que nous avons donnée à l'occasion de la dilatation des corps liquides. Il faut aussi observer avec soin la pression barométrique, car si elle variait dans les différentes expériences, il faudrait réduire le volume du gaz à ce qu'il aurait été si la pression eût été constante, et pour cela on se servirait de la loi de Mariote, savoir: que les volumes des gaz sont en raison inverse des poids comprimans. La pression barométrique est la seule qui s'exerce sur le gaz renfermé dans la boule et dans le tube, car le tube étant horizontal, l'index de mercure ne pèse que sur la paroi du tube; mais si le tube était vertical, il est évident qu'il faudrait ajouter ou retrancher sa longueur de la hauteur barométrique, suivant que l'ouverture du tube serait placée en haut ou en bas.

M. Gay-Lussac a reconnu, par le mode d'opération que nous venons de décrire, que tous les gaz se dilatent uniformément, c'est-à-dire, d'une même quantité pour un même accroissement de température, et que, pour tous, la dilatation correspondante à 1° du thermomètre centigrade est de 0,00375 de leur volume à zéro, de sorte que si l'on représente par 1 le volume d'un gaz quelconque à zéro, à 100°, le volume sera $1+100\times0,00375$ ou 1,375.

Cette belle loi a été découverte presque en même temps par Mrs Gay-Lussac et Dalton habile physicien de Manchester; mais ce dernier avait trouvé 0,372 pour la dilatation absolue de 0° à 100°. Mrs Petit et Dulong, dans le Mémoire sur la Chaleur que nous avons déjà cité, ont

constaté, par de nouvelles observations, que l'égalité de dilatation de tous les gaz que M. Gay-Lussac avait reconnue dans les températures comprises entre 0° et 100°, existait jusqu'à 36° au-dessous de 0°, et s'étendait à 300° au delà ; mais l'uniformité de dilatation d'un même gaz, qui se vérifie depuis 36° jusqu'à 100° n'existe plus au delà de 100 ; les dilatations deviennent décroissantes pour de mêmes accroissemens de température, comptées sur le thermomètre à mercure.

383. L'air se dilatant par la chaleur, et d'autant plus qu'il est plus échauffé, les variations de densité de l'air inégalement échauffé sont, comme nous l'avons dit, les principales causes des mouvemens naturels ou artificiels qui se manifestent dans l'atmosphère. Nous allons appliquer les principes que nous venons de poser à l'explication des courans produits par les cheminées, et à la mesure de leur vitesse.

Soit A B (*fig.* 249.) un tuyau prismatique vertical, ouvert par les deux bouts et plein d'air à une température constante et supérieure à celle de l'atmosphère ; il est évident que cette colonne d'air chaud tendra à descendre avec une force égale à son poids, et sera au contraire poussée de bas en haut par l'air environnant avec une force égale au poids d'une même colonne d'air à la température extérieure ; or, comme ce dernier poids est plus grand que le premier, la colonne d'air chaud s'élèvera, et au moyen de la loi de Gay-Lussac, on peut facilement calculer sa force ascensionnelle, lorsqu'on connaît et la température de l'air de la colonne et celle de l'air ambiant. En effet, supposons que l'air atmosphérique soit à zéro, celui de la colonne à 100°, et la hauteur du tuyau de 50 mètres. D'après la loi de la dilatation des gaz, les volumes d'une même masse de gaz à 0° et à 100° sont comme 1 est à 1,375, et comme les densités sont en raison inverse des volume son déterminera celui de l'air chaud, au moyen de la proportion $1,375 : 1 :: 1 : x$, d'où $x = 0,727$. La densité de l'air extérieur étant 1, en multipliant cette densité par la hauteur de la colonne, on aura son poids, qui est $0,727 \times 50 = 36,35$, c'est-à-dire, que la colonne de 50^m pèse autant que la colonne d'air froid de 36^m,35, par conséquent la force ascensionnelle sera le poids d'une colonne d'air égale à $50^m - 36,35 = 13^m,65$.

En général si on représente par h la hauteur de la colonne, par t la température de l'air extérieur, et par t' celle de la colonne, la densité de l'air extérieur sera $\frac{1}{1+t.0,00375}$, celle de l'air chaud sera $\frac{1}{1+t'0,00375}$ et la force ascensionnelle sera $F=h.\left\{\frac{1}{1+t.0,00375}-\frac{1}{1+t'.0,00375}\right\}$.

Si on voulait déterminer la vitesse d'ascension de la colonne d'air chaud, il faudrait considérer que tous les phénomènes se passent comme si la colonne d'air chaud avait une densité égale à celle de l'air extérieur, n'occupait qu'une portion de la longueur du tuyau, et était poussée par la pesanteur à se mouvoir dans la partie supérieure vide de ce tuyau. Par exemple, dans le cas que nous avons choisi plus haut, tout se passe comme si dans le prisme de 50^m une colonne inférieure de 36^m,35 se mouvait par l'effet de la pesanteur (et non par son élasticité), dans les 13^m,65 supérieurs vides; le mouvement serait tout-à-fait assimilable à celui d'un liquide renfermé dans les deux branches parallèles d'un siphon renversé de 50^m, dans lequel une des branches, à l'origine du mouvement, renfermerait une colonne d'eau de 36^m,35, et l'autre de 50^m: pendant tout le mouvement la vitesse serait en sens contraire de celle de la chute d'un corps libre; elle serait très-petite au commencement, augmenterait proportionnellement au temps, et à l'extrémité du tuyau, elle serait égale à celle qu'un corps aurait acquise en tombant de 13^m,65. Or, il est très-facile de trouver cette vitesse, car nous avons vu (74,75) que dans la chute libre des corps, les vitesses sont proportionnelles aux temps, et les espaces parcourus croissent comme les carrés des temps employés à les parcourir; par conséquent, en appelant t le temps, e l'espace parcouru pendant le temps t, et g l'espace parcouru dans l'unité de temps, espace qui est égal à 4^m,9044 (88), on a évidemment $v=gt$, et $e=\frac{gt^2}{2}$, car en faisant $t=1$, e doit être égal à g. En éliminant t entre ces deux équations, il vient $v^2=2ge$ et $v=\sqrt{2ge}$.

Ainsi on voit que la force de tirage d'une cheminée est d'autant plus grande qu'elle est plus élevée et que l'air y est à une plus haute température. Si le tuyau de cheminée avait la forme d'un siphon renversé ABC (*fig.* 250), que le foyer fût en A et l'ouverture de la cheminée en C, la fumée d'elle-même ne pourrait pas descendre le tuyau AB; mais on parviendrait facilement à lui faire prendre cette direction en plaçant au bas du tuyau BC un petit foyer momentané, qui remplirait d'air chaud le tuyau BC; alors, une fois le mouvement imprimé, il continuerait de lui-même sans l'intervention du foyer d'appel. Car la cheminée d'ascension BC étant plus grande que le tuyau de descente AB, la colonne BC

monterait et forcerait celle de AB à descendre, seulement dans ce cas la force ascensionnelle du courant serait égale à la différence de celle des deux tuyaux AB et BC. Dans le cas où la fumée conserverait la même température dans tous les points du tuyau ABC, la force ascensionnelle serait égale à celle d'une colonne d'air chaud, ayant pour hauteur la différence de hauteur des deux colonnes AB et BC; si la partie inférieure B du canal était très-longue (*fig.* 251), et si la fumée s'y refroidissait complètement, on ne pourrait déterminer le mouvement dans le sens BC qu'au moyen d'un appel permanent. Mais si dans le canal B la fumée perdait seulement une portion de sa chaleur, de manière qu'il lui restât toujours un excès de température sur celle de l'air environnant, il existerait toujours une certaine hauteur de cheminée BC, pour laquelle le tirage aurait encore lieu. La détermination de cette hauteur se fera facilement, d'après ce qui précède. Cette dernière question se rencontre très-souvent dans la construction des appareils destinés à condenser les vapeurs acides des fabricans de soude.

384. Les différentes méthodes que nous avons données pour déterminer les densités des corps solides, liquides et gazeux, ne pouvant pas s'effectuer à la température de 4° pour les solides et les liquides, ni à celle de zéro pour les corps gazeux, il faut nécessairement corriger les nombres que l'on obtient directement de l'influence de la température : ces corrections se font facilement au moyen de ce qui précède. En effet, s'il s'agit de la pesanteur spécifique d'un corps solide, les élémens qui sont donnés immédiatement par l'observation sont le poids du corps et celui d'un égal volume d'eau : le corps ayant été pesé dans l'air, on commencera par retrancher de son poids celui d'un égal volume d'air à la température de l'observation, on prendra pour volume du corps un nombre de centimètres égal au nombre de grammes que contient le poids de l'eau déplacée ; cela suppose, à la vérité, que l'expérience a été faite à 4°; mais l'erreur qui en résultera sera tout-à-fait négligeable ; après quoi on calculera le volume du corps à la température de 4°, en employant les mêmes formules que pour ramener les observations barométriques à une même température ; on corrigera le poids du volume d'eau d'une quantité correspondante ; il ne restera plus alors qu'à ramener le poids de ce volume d'eau à la température de 4°, et c'est ce qui se fera au moyen des tables précédentes. S'il s'agit de la densité d'un liquide, il n'y aurait aucune correction à faire si toutes les pesées étant faites à la même température, les liquides suivaient la même loi de dilatation. Mais comme on ne peut pas compter

sur une égalité de température assez prolongée pour permettre de faire les trois pesées, et que la loi de dilatation des liquides varie pour chacun d'eux, il faudra calculer les volumes correspondans des deux masses liquides à la température de 0°. S'il y avait une grande inégalité dans les températures des observations, il serait indispensable de calculer les différences des volumes provenant de la dilatation du verre, lorsque l'un emploie la méthode de peser un même vase successivement rempli des deux liquides ; mais comme la dilatation des corps solides est très-petite, une différence d'un petit nombre de degrés dans la température ne produit pas un accroissement sensible de volume. Relativement aux corps gazeux, si la température et la pression restent constantes pendant la durée des observations, il n'y aura aucune correction à faire ; mais si ces élémens sont variables, il faudra, 1° ajouter à chaque pesée le poids du volume d'air déplacé; on déterminera approximativement le volume du ballon par le poids de l'eau qu'il peut contenir, en se rappelant qu'un kilogramme d'eau occupe un décimètre cube à 4°, et on calculera facilement le poids de ce volume d'air et la pression à la température atmosphérique de l'observation, au moyen des lois de Mariote et de Gay-Lussac ; 2° il faudra ramener les volumes de gaz dont on connaît les poids à celui qu'il aurait à 0°, et sous la pression de $0^m,76$.

B. *Des Vapeurs.*

385. Les liquides abandonnés à l'air atmosphérique ou dans tout autre gaz, à une température quelconque, ceux qui sont soumis à l'action directe d'un foyer, et enfin ceux qui sont placés dans un espace vide, se dissipent. Les corps gazeux dans lesquels les liquides se transforment dans ces circonstances, portent le nom de *vapeurs*. Pour étudier les propriétés des vapeurs, nous les considérerons successivement dans le vide et mêlées avec les autres gaz.

386. *Vapeurs dans le vide.* M. Dalton, à qui nous devons presque tout ce que nous allons dire sur la théorie des vapeurs, a employé l'appareil suivant pour observer leur formation et leur propriété dans le vide. A B est un baromètre gradué reposant dans une large cuvette M N ; on introduit dans le tube barométrique, et par sa partie inférieure, une petite quantité de liquide qui, par sa légèreté spécifique, s'élève à travers le mercure et atteint rapidement la chambre barométrique *m n*. On reconnaît alors 1° qu'à l'instant où le liquide arrive au niveau du mercure, le mercure

descend d'une certaine quantité constante pour le même liquide et la même température, quelle que soit d'ailleurs l'étendue de la chambre barométrique *m n* (*fig.* 252) et la quantité du liquide introduit, pourvu qu'il soit en excès; 2° qu'en enfonçant le tube dans la cuvette, ce qui augmente la pression supportée par la vapeur, une partie de celle-ci se condense, et l'abaissement du baromètre reste constant; 3° que si on relève le baromètre, ce qui tend à diminuer la pression que supporte la vapeur, le liquide excédant fournit de nouvelles vapeurs, et l'abaissement du mercure reste encore le même; 4° que si on n'avait pas introduit un excès de liquide dans la chambre, à mesure que l'on augmenterait sa capacité, en soulevant le tube, la vapeur se dilaterait, et sa force élastique, mesurée par l'abaissement du mercure, demeurerait en raison inverse du volume ou proportionnellement à sa densité.

Il résulte de ces observations, qu'un liquide mis en contact avec un espace vide, émet instantanément toute la vapeur qui peut se former; que cette quantité est proportionnelle à l'étendue de l'espace vide, que sa force élastique est indépendante de l'étendue de cet espace, que la vapeur n'augmente ni de densité ni de force élastique par la pression, et qu'enfin, lorsqu'on augmente l'espace dans laquelle elle se forme, s'il y a un excès de liquide, il fournit de nouvelles vapeurs pour saturer l'augmentation d'espace, et que, s'il n'existe plus de liquide, la vapeur se dilate comme un gaz.

La propriété qu'ont les vapeurs de passer à l'état liquide par la pression et de ne point se comprimer comme les gaz, est le caractère qui les distingue principalement de ces derniers.

Pour mesurer la force élastique des vapeurs à différentes températures, Dalton se servait encore du même appareil, mais il enveloppait le baromètre d'un cylindre de verre (*fig.* 253) fermé inférieurement par un bouchon de liége percé d'un trou à travers lequel passe le tube barométrique; ce cylindre est destiné à recevoir de l'eau à différentes températures. Dalton a observé, au moyen de cet appareil, que si dans la chambre barométrique il n'existait que de la vapeur sans liquide excédant, la vapeur se dilatait comme un gaz permanent; mais que s'il se trouvait

une quantité suffisante de liquide, il se formait de nouvelles vapeurs à mesure que la température s'élevait, et que la force élastique de ces vapeurs croissait bien plus rapidement que celle des gaz permanens dans les mêmes circonstances. Par exemple, de 0° à 100° la force élastique des gaz est dans le rapport de 1 à 1,375, et la force élastique de la vapeur sur un excès de liquide est comme 1 est à 160.

En répétant ces expériences sur un grand nombre de liquides, et faisant pour chacun d'eux varier la température dans toutes les limites inférieures à leur ébullition, le physicien de Manchester a découvert cette loi générale : toutes les vapeurs qui se produisent dans le vide par un excès de liquide, ont une force élastique égale à la pression de l'atmosphère à la température de leur ébullition, et à partir de cette température, leurs tensions sont égales, à des températures également éloignées de leur ébullition. Par exemple, l'alcool bout à 78°, et l'eau à 100°; à ces températures les forces élastiques de la vapeur d'eau et d'alcool sont égales, celle de l'alcool à 76 est égale à celle de l'eau à 98, et ainsi de suite. Il résulte de cette loi que les liquides qui bouillent à des températures très-élevées, donnent à de basses températures des vapeurs dont la force élastique est très-faible. Le mercure, par exemple, qui ne bout qu'à environ 347°, donne à zéro des vapeurs dont la force élastique est égale à celle de la vapeur d'eau à 247° au-dessous de zéro.

Il résulte de la loi que nous venons d'énoncer, que pour connaître et déterminer les forces élastiques des vapeurs formées par tous les liquides, il suffit 1° d'avoir une table qui présente les forces élastiques des vapeurs fournies par un seul liquide pour chaque degré du thermomètre, et de connaître la température de l'ébullition de tous les autres. C'est pour cette raison que nous donnons ici un tableau de la force élastique de la vapeur d'eau (1).

---

(1) Des expériences récentes ont démontré que celle loi de Dalton n'est point rigoureuse; mais le plus souvent on peut la regarder comme une approximation suffisante.

Force élastique de la vapeur d'eau en millimètres de mercure pour chaque degré du thermomètre centigrade.

Degrés.	Tension.	Degrés	Tension.	Degrés	Tension.	Degrés.	Tension.	Degrés.	Tension.
− 20	1,333	11	10,074	42	58.792	73	261,43	104	873,44
− 19	1,429	12	10,707	43	61.958	74	273.03	105	903,64
− 18	1 531	13	11,378	44	65.627	75	285.07	106	934 81
− 17	1,638	14	12,087	45	68,751	76	297,57	107	966.31
− 16	1,753	15	12.837	46	72,393	77	310,49	108	994,79
− 15	1,879	16	13,630	47	76,205	78	323.89	109	1032,04
− 14	2,011	17	14,468	48	80,195	79	337.76	110	1066.06
− 13	2,152	18	15.353	49	84,370	80	352,08	111	1100 87
− 12	2,302	19	16,288	50	88.742	81	367.00	112	1136,43
− 11	2,461	20	17.314	51	93.301	82	382,38	113	1172,78
− 10	2,631	21	18.317	52	98.075	83	398.28	114	1209.90
− 9	2,812	22	19.417	53	103,06	84	414.73	115	1247.81
− 8	3.005	23	20.577	54	108.27	85	431.71	116	1286.51
− 7	3,210	24	21,805	55	113.71	86	449.26	117	1325,98
− 6	3.428	25	23,090	56	119.39	87	467.38	118	1366.22
− 5	3,660	26	24.452	57	125.31	88	486.09	119	1407.24
− 4	3,907	27	25.881	58	131,50	89	505.38	120	1448.83
− 3	4.170	28	27,390	59	137.94	90	525.28	121	1491.58
− 2	4.448	29	29,045	60	144,66	91	545.80	122	1534.89
− 1	4,745	30	30,643	61	151,70	92	566.95	123	1578.96
0	5.059	31	32,410	62	158.96	93	588.74	124	1623.67
1	5,393	32	34,261	63	166.56	94	611,18	125	1669.31
2	5,748	33	36.188	64	174.47	95	634,27	126	1715.58
3	6.123	34	38.254	65	182,71	96	658,05	127	1762,56
4	6,523	35	40.404	66	191,27	97	682,59	128	1810,25
5	6,947	36	42.743	67	200.18	98	707,63	129	1858,63
6	7,396	37	45,038	68	209.44	99	733,46	130	1907,67
7	7,871	38	47.579	69	219,06	100	760,00		
8	8,375	39	50.147	70	229,07	101	787,27		
9	8,909	40	52.998	71	239.45	102	815,26		
10	9,475	41	55,772	72	250,23	103	843,98		

Force de la Vapeur exprimée en pression atmosphérique de 0°,76.

Températures centigrades.	Pression en Atmosphères	Températures centigrades	Pression en Atmosphères.	Températures centigrades.	Pression en Atmosphères.	Températures centigrades.	Pression en Atmosphères.
100	1	176	11	197	21	209	32
122	2	179	12	198	22	210	33
135	3	182	13	200	23	211	34
144	4	184	14	201	24	212	35
151	5	186	15	202	25	213	36
157	6	188	16	203	26	214	37
162	7	190	17	204	27	215	38
166	8	192	18	206	28 à 29	216	35
170	9	194	19	207	30		
173	10	195	20	208	31		

Au lieu du baromètre employé par M. Dalton, on se sert aussi d'un appareil qu'on désigne sous le nom de *Manomètre*, et qu'il est utile de connaître : il consiste en un ballon de verre M (*fig.* 254) fermé par un bouchon de cuivre, à travers lequel passe la tige d'un baromètre à siphon *abc* ; au bouchon sont aussi adaptés deux tuyaux à robinets *m* et *n*. Le premier est fixé à un tuyau de plomb qui communique avec le récipient d'une machine pneumatique, au moyen de laquelle on fait le vide dans le ballon ; l'autre robinet n'a point sa clef percée de part en part, elle est seulement creusée de manière à prendre dans l'entonnoir qui surmonte le robinet une goutte du liquide qu'il renferme, pour le verser dans le ballon sans faire communiquer la capacité de ce dernier avec l'air : du reste on fait l'opération comme précédemment ; on fait le vide dans le ballon, on introduit une goutte de liquide par le robinet *m*, on plonge le ballon dans des bains à différentes températures, et on observe l'élévation du baromètre.

M. Gay-Lussac a fait construire une appareil très-commode pour mesurer la force élastique de différens liquides à la même température. Cet appareil (*fig.* 255) est composé d'un grand nombre de tubes barométriques rangés circulairement autour d'un axe fixe A B, plongeant dans le milieu d'une grande cuvette *a b* pleine de mercure ; les baromètres sont fixés à des cercles de cuivre *m n m' n'*, fixés eux-mêmes à l'axe A B ; cet axe en tournant entraîne les baromètres qui viennent successivement se présenter devant une tige graduée *p q*, où l'on mesure la dépression occasionnée par les vapeurs du liquide qu'on a introduit dans les tubes : un d'eux doit rester vide de vapeurs pour servir de termes de comparaison.

387. La détermination de la densité des vapeurs est très-importante, mais cette détermination directe présente de grandes difficultés : M. Gay-Lussac est parvenu à résoudre ce problème d'une manière fort ingénieuse, en le renversant. Il s'est proposé de déterminer le volume de vapeurs que pouvait produire à la température de son ébullition un volume donné de liquide. L'appareil qu'il a employé pour cet objet consiste (*fig.* 256) en une cloche de verre A B divisée en parties d'égale capacité et dont on connaît exactement le volume ; on remplit cette cloche de mercure et

on la renverse dans une chaudière de fonte M N pleine de ce métal. Pour introduire dans la cloche un volume déterminé de liquide, on se sert d'une très-petite boule de verre *m*, terminée par un petit tube court et très-capillaire ; on pèse cette boule vide, on la remplit de liquide (1) et on la pèse de nouveau : la différence entre ces deux poids donne évidemment celui du liquide, dont on déduit facilement son volume, au moyen de sa densité et de ce que 1^g d'eau occupe à 4° le volume d'un centimètre cube ; on ferme l'extrémité de la tige de la boule en fondant le verre, et on introduit la boule sous la cloche AB : par sa légèreté spécifique elle traverse le mercure et vient à la partie supérieure de la cloche ; alors on met de l'eau dans le cylindre CD, et on chauffe la chaudière MN ; la température du mercure et de l'eau étant arrivée à 100°, le liquide renfermé dans la boule *m*, par la force élastique de la vapeur qu'il tend à former, brise son enveloppe, et les vapeurs se répandant à la partie supérieure de la cloche, font descendre le mercure. On mesure le nombre de degrés occupés par cette vapeur, et en corrigeant ce volume apparent de la dilatation du verre, on a le volume réel de la vapeur à 100°, sous une pression égale à celle de l'air diminuée de la hauteur du mercure de la cloche au-dessus du niveau du bain. Mais pour avoir des volumes comparables entre eux, on réduit le volume obtenu à ce qu'il serait sous la pression de 0,76, au moyen de la loi de Mariote ; pour mesurer la hauteur du mercure dans la cloche au-dessus du niveau de ce métal dans le bain extérieur, M. Gay-Lussac s'est servi d'une tige en fer graduée P Q, garnie d'une traverse R S que l'on appuyait sur les bords de la marmite M N, bords qui avaient été dressés à l'éméri et rendus parfaitement horizontaux au moyen d'un niveau à bulle d'air ; il enfonçait la tige P Q dans la traverse R S jusqu'à ce que la pointe Q coïncidât avec le mercure, ce que l'on reconnaissait facilement, car alors l'extrémité de la pointe touche l'extrémité de son image ; ensuite, au moyen d'une lunette horizontale T U, garnie d'un fil horizontal, que l'on montait au niveau du

(1) Pour remplir cette boule, on la fait chauffer et on plonge son extrémité dans un vase renfermant le liquide que l'on veut introduire.

mercure de la cloche A B, on obtenait d'une manière très-précise la distance de son niveau à celui de la chaudière.

388. M. Gay-Lussac a trouvé ainsi qu'un gramme d'eau pure produisait 1l,6964 de vapeurs à 100°, sous la pression de 0,76; c'est-à-dire, qu'un volume d'eau d'un centimètre cube produit 1696 décimètres cubes de vapeur. Ainsi la densité de la vapeur d'eau est à celle de l'eau comme 1 est à 1696; et un litre de vapeur d'eau pèse $\frac{18}{1,6964}$, et comme un litre d'air sec à la pression 0,76 et à la température de 100° pèse $\frac{18}{1,0577}$, le poids de la vapeur aqueuse est à celui de l'air comme 1,0577 est à 1,6964, ou à peu près comme 10 est à 16, et ce rapport subsistera dans toutes les autres circonstances de pression et de température, puisque le gaz et les vapeurs se dilatent en suivant les mêmes lois.

Tableau de la densité de quelques vapeurs, celle de l'air dans les mêmes circonstances et à la même température étant prise pour unité.

NOMS DES LIQUIDES.	DENSITÉ.	TEMPÉRATURES DE L'ÉBULLITION.
Eau..................................	0,6235	100
Acide hydro-cyanique..................	0,9476	26,50
Alcool................................	1,6138	78
Ether hydro-chlorique.................	2,219	11
Ether sulfurique......................	2,5860	36
Sulfure de carbone....................	2,6447	47
Essence de térébenthine...............	5,0130	157
Ether hydriodique.....................	5,4749	65

389. *Vapeurs dans les gaz.* Pour observer les phénomènes que présentent les mélanges de vapeurs et de gaz, on se sert de l'appareil (*fig.* 254): après avoir fait le vide dans le ballon, on y introduit le gaz dans lequel on veut développer les vapeurs, le baromètre *a b c* en mesure la tension; ensuite par le robinet *n* on fait tomber dans le ballon le liquide qui doit

être réduit en vapeur, puis on place le manomètre dans un bain à la température où l'on veut faire l'expérience. Dalton a reconnu par ce procédé, 1° que les vapeurs qui se développaient dans le gaz ne saturaient pas instantanément l'espace occupé par le gaz, qu'il fallait un certain temps depuis l'instant où le liquide était introduit jusqu'à celui où le baromètre devenant stationnaire indiquait qu'il ne se formait plus de vapeurs; 2° que la force élastique des mélanges de gaz et de vapeurs était égale à la force élastique du gaz plus à celle de la vapeur qui se développerait dans le vide à la même température; 3° que la quantité de vapeurs qui se formait dans un gaz était égale à celle qui se formait dans un même espace vide à la même température.

Il en résulte que les vapeurs se développent dans le gaz comme dans le vide, seulement les gaz opposent à l'évaporation un obstacle mécanique qui la retarde. Les vapeurs qui pénètrent les gaz ne supportent point la pression à laquelle est soumis le gaz dans lequel elle est disséminée; du moins cette pression ne la fait pas passer à l'état liquide comme elle le ferait si elle était dans le vide. La vapeur se loge dans le gaz comme dans un espace vide de même volume et à la même température, et elle n'éprouve de variations de force élastique que par la chaleur.

390. *Hygrométrie.* On désigne sous le nom d'état hygrométrique d'un gaz la quantité d'eau en vapeurs qu'il renferme, et les instrumens qui servent à mesurer le degré d'humidité des gaz portent le nom d'*hygromètres.*

391. Tous les hygromètres connus sont fondés sur les variations du volume que l'humidité plus ou moins grande de l'atmosphère fait éprouver à la plupart des substances végétales et animales: le papier, le parchemin et toutes les membranes animales se dilatent par l'humidité; les cordes de chanvre et de boyaux se tordent, les cheveux s'allongent. On concevra facilement, d'après cela, le jeu des hygromètres qui représentent différens objets en carton, dans lesquels une pièce mobile est fixée à l'extrémité d'une petite corde de boyau, et de ceux qui sont formés d'un tube capillaire en verre, terminé par un tuyau de plume ou une vessie de souris pleine de mercure; ces derniers ont tout-à-fait la forme d'un thermomètre, mais c'est principalement les dilatations et les

contractions de l'enveloppe du réservoir par l'état hygrométrique de l'air qui font monter ou descendre le mercure.

De tous les hygromètres connus il n'en est qu'un seul dont les indications soient constantes dans les mêmes circonstances et sur les différens instrumens ; c'est celui qui a été imaginé par de Saussure. Cet instrument consiste (*fig.* 257) en un cadre de cuivre A B C D ; un cheveu *a b* suspendu en *a* à une petite pince que l'on monte ou l'on descend par une vis et tendu par un petit poids *c*, se roule sur un petit cylindre mobile sur son axe et portant à sa circonférence une aiguille *mn*, dont l'extrémité parcourt la portion de cadran *p q*. Le cheveu en s'allongeant par l'humidité et ne pouvant pas glisser sur la circonférence du petit cylindre *c*, le fait tourner, et l'aiguille parcourt un nombre de degrés proportionnel à cet allongement. Pour construire cet appareil, de Saussure commence par faire bouillir les cheveux dans de l'eau un peu alcaline, afin de dissoudre la matière grasse qui les recouvre, ensuite il place l'hygromètre dans un récipient qui contient des matières très-déliquescentes, telles que de la chaux vive, du muriate de chaux, etc., qui dessèchent complètement l'air ; l'aiguille *m n* s'arrête en un certain point du cadran *pq*, où l'on marque *o* ou sécheresse extrême ; ensuite il place l'hygromètre dans un autre récipient dont les parois sont mouillées, et dont l'air est bientôt saturé d'humidité, l'aiguille s'élève et devient bientôt stationnaire en un point où l'on marque 100° ou humidité extrême. Lorsque l'hygromètre à cheveu est construit avec beaucoup de soin, on remarque : 1° que, placé dans les mêmes circonstances, ses indications sont toujours identiques ; 2° que quelle que soit la température de l'air, s'il est saturé, l'aiguille marque toujours 100°, et s'il est parfaitement sec, l'aiguille s'arrête au zéro de l'échelle. On doit conclure de là que l'action hygrométrique du cheveu est constante, que l'effet de la température pour faire varier sa longueur est sensiblement nulle dans les limites de température de l'atmosphère, et enfin, que quelle que soit la température de l'air, pourvu qu'il soit saturé de vapeur, le cheveu s'empare de la même quantité d'eau, puisqu'il s'allonge de la même quantité ; cependant la quantité de vapeurs qui sature de l'air à différentes températures est extrêmement variable : pour concevoir ce

dernier résultat, il faut se souvenir que quand l'air est saturé de vapeur, la plus petite pression, le plus petit abaissement de température ou la plus petite force suffisent pour convertir en eau une portion de la vapeur. Or, comme l'affinité du cheveu pour l'eau, quelque petite qu'elle soit, est toujours suffisante pour convertir une portion de cette vapeur en eau, et comme la quantité d'eau nécessaire pour saturer le cheveu est toujours excessivement petite, comparée à celle qui sature l'air dans lequel il est plongé, le renouvellement des couches d'air qui environnent le cheveu finit par lui fournir toujours la même quantité de liquide.

Ainsi les indications de l'hygromètre de Saussure sont indépendantes de la température ; elles marquent seulement la saturation plus ou moins complète de l'air à la température de l'observation. Pour pouvoir déduire de l'observation de cet instrument la force élastique de la vapeur, il faudrait connaître la tension de la vapeur correspondante à chaque degré de l'hygromètre, et cela pour toutes les températures. M. Gay-Lussac est parvenu à déterminer ces tensions pour une température déterminée, celle de 10° centigrades, par un moyen extrêmement simple. Il existe des substances qui ont une si grande affinité pour l'eau, qu'elles dessèchent promptement l'air dans lequel elles sont plongées ; mais lorsqu'elles sont déjà combinées avec une certaine quantité d'eau, cette action hygrométrique diminue, et si on augmente progressivement la quantité d'eau, bientôt elles émettent des vapeurs en quantité croissante pour la même température, et finissent par saturer complètement de vapeur, comme l'eau pure, l'espace environnant ; en introduisant ainsi dans un ballon où l'on avait placé un hygromètre des dissolutions salines dont on avait déterminé d'avance la tension en les faisant passer dans la chambre d'un tube barométrique, on connaissait la tension de vapeur correspondante à l'indication de l'hygromètre. C'est ainsi que M. Gay-Lussac a formé le tableau suivant.

TABLEAU de la force élastique de la vapeur correspondante aux degrés de l'hygromètre, à la température de 10° centésimaux, exprimée en centièmes de la tension à la saturation.

TENSION de LA VAPEUR.	DEGRÉS correspondans DE L'HYGROMÈTRE.	TENSION de LA VAPEUR	DEGRÉS correspondans DE L'HYGROMÈTRE	DEGRÉS de L'HYGROMÈTRE	TENSIONS correspondantes DE LA VAPEUR.	DEGRÉS de L'HYGROMÈTRE	TENSIONS correspondantes DE LA VAPEUR.
0°	0,00	51	72,94	0°	0,00	51	28,58
1	2,19	52	73,68	1	0,45	52	29,38
2	4,37	53	74,41	2	0,90	53	30,17
3	6,56	54	75,14	3	1,35	54	30,97
4	8,75	55	75,87	4	1,80	55	31,76
5	10,94	56	76,54	5	2,25	56	32,66
6	12,93	57	77,21	6	2,71	57	33,57
7	14,92	58	77,88	7	3,18	58	34,47
8	16,92	59	78,55	8	3,64	59	35,37
9	18,91	60	79,22	9	4,10	60	36,28
10	21,91	61	79,84	10	4,57	61	37,31
11	22,81	62	80,46	11	5,05	62	38,34
12	24,71	63	81,08	12	5,52	63	39,36
13	26,61	64	81,71	13	6,00	64	40,39
14	28,51	65	82,32	14	6,48	65	41,42
15	30,41	66	82,90	15	6,96	66	42,58
16	32,08	67	83,48	16	7,46	67	43,73
17	33,76	68	84,06	17	7,95	68	44,89
18	35,43	69	84,64	18	8,45	69	46,04
19	37,11	70	85,22	19	8,95	70	47,19
20	38,78	71	85,77	20	9,45	71	48,51
21	40,27	72	86,37	21	9,97	72	49,82
22	41,76	73	86,86	22	10,49	73	51,14
23	43,26	74	87,41	23	11,01	74	52,45
24	44,75	75	87,95	24	11,53	75	53,76
25	46,24	76	88,47	25	12,15	76	55,25
26	47,55	77	88,99	26	12,59	77	56,74
27	48,86	78	89,51	27	13,14	78	58,23
28	50,18	79	90,03	28	13,69	79	59,73
29	51,49	80	90,35	29	14,23	80	61,22
30	52,81	81	90,05	30	14,78	81	62,89
31	53,96	82	91,55	31	15,36	82	64,57
32	55,14	83	92,05	32	15,94	83	66,24
33	56,27	84	92,54	33	16,32	84	67,92
34	57,42	85	93,04	34	17,10	85	69,59
35	58,58	86	93,52	35	17,68	86	71,49
36	59,61	87	94	36	18,30	87	73,39
37	60,64	88	94,48	37	18,92	88	75,29
38	61,66	89	94,95	38	19,54	89	77,19
39	62,69	90	95,43	39	20,16	90	79,09
40	63,72	91	95,90	40	20,78	91	81,09
41	64,65	92	96,36	41	21,45	92	83,08
42	65,53	93	96,82	42	22,12	93	85,08
43	66,43	94	97,29	43	22,79	94	87,07
44	67,34	95	97,75	44	23,46	95	89,06
45	68,24	96	98,21	45	24,13	96	91,25
46	69,03	97	98,69	46	24,86	97	93,44
47	69,83	98	99,10	47	25,59	98	95,63
48	70,62	99	99,55	48	26,32	99	97,81
49	71,42	100	100	49	27,06	100	100
50	72,21			50	27,79		

Le premier tableau donne les degrés de l'hygromètre correspondans à chaque centième de force élastique de la vapeur, et le second, la force élastique de la vapeur correspondante à chaque degré de l'hygromètre. Ce tableau est le résultat des observations qui ont été faites à la température de 10°, par conséquent il n'est rigoureusement exact que pour cette température; cependant on peut le considérer comme suffisamment approché pour toutes les températures comprises entre 0° et 100°.

391. Dans les voyages sur de hautes montagnes et dans des aérostats, on a remarqué qu'à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, l'air, qui devient toujours moins dense, baisse en même temps et de température et d'état hygrométrique. Ainsi, dans le voyage de M. Gay-Lussac, la température au lieu de départ du ballon était de 27°, et à 6000 mètres elle n'était plus que de 9° au-dessous de zéro, et l'air était si sec que les membranes animales, telles que le parchemin, se tordaient comme si elles avaient été exposées au feu. L'abaissement de température est une suite nécessaire du rayonnement des couches d'air supérieures vers le ciel, qui n'est point compensé par le rayonnement de la terre. Quant à la diminution de l'humidité, nous n'en connaissons point la cause; mais en l'admettant comme un fait, elle explique comment il arrive que le beau temps suit immédiatement l'élévation du baromètre, et la pluie son abaissement; car dans le premier cas, les nuages doivent s'élever davantage, et pénétrant dans des couches d'air plus sèches, la vapeur qui les forme se dissipe facilement; dans le second cas, les nuages descendent dans les basses régions de l'atmosphère et s'y résolvent en eau.

C. *Calorique spécifique.*

392. Tous les corps sous le même poids exigent des quantités inégales de chaleur pour élever leur température d'un même nombre de degrés du thermomètre; par exemple, la quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 kilog. d'eau de 0° à 3° serait suffisante pour élever un même poids de mercure de 0° à 100°. La quantité de chaleur absorbée par un même poids des corps pour élever leur température d'un même nombre de degrés,

s'appelle calorique spécifique; elle est l'effet de leur capacité calorifique. Pour mesurer les capacités calorifiques des corps, on est convenu de les rapporter à celle de l'eau que l'on prend pour unité. La détermination de la chaleur spécifique des corps ne peut évidemment se faire qu'en employant la chaleur qui se dégage pendant un abaissement connu de température, à produire un effet qui soit proportionnel à la quantité de chaleur dégagée du corps; de tous les effets produits par la chaleur, celui qui paraît le plus propre à l'objet en question, est la fusion de la glace; en effet, ce corps, comme nous le verrons plus tard, fond toujours à la même température; et si l'on soumet une masse quelconque de glace à l'action d'un foyer, l'eau provenant de la glace fondue ne s'échauffera pas tant qu'il en restera encore à fondre; de sorte qu'à la fin de la fusion, l'eau sera à la température de la glace au commencement, et toute la chaleur reçue par la glace aura été employée à en liquéfier une partie sans élever sa température. D'après cela si on pouvait se procurer une sphère creuse de glace, et si on pouvait y placer successivement une même masse des différens corps à la même température, les quantités de glaces qu'ils auraient fondues jusqu'à leur entier refroidissement seraient proportionnelles à leur capacité calorifique. L'appareil imaginé par Mrs Laplace et Lavoisier, et au moyen duquel ils ont déterminé un grand nombre de capacités calorifiques, est analogue à celui que nous venons de décrire.

Calorimètre de Mrs Laplace et Lavoisier. Cet appareil se compose (*fig.* 258) de trois boîtes cylindriques concentriques ABCD, EFGH, IKLM. La première est en fil de laiton, les deux dernières sont en ferblanc. La première est destinée à recevoir le corps dont on veut mesurer la chaleur spécifique; l'espace entre la première et la seconde, de même que celui de la seconde à la troisième, est rempli de glace; le cylindre EFGH communique à l'extérieur par un tuyau vertical dont l'extrémité est garnie d'un robinet O; la dernière boîte IKLM est également garnie à sa partie inférieure d'un tuyau garni d'un robinet N, mais ce tuyau est légèrement incliné à l'horizon; la dernière enveloppe se ferme supérieurement par un couvercle à rebord qui permet de le couvrir de glace. D'après cette

disposition, il est évident que la chaleur provenant du refroidissement du corps renfermé dans le cylindre ABCD, se portant toute entière sur la glace renfermée dans l'enceinte EFGH qui l'entoure de toute part, sera en totalité employée à en fondre une partie, et aucune autre cause ne pourra concourir avec celle-là pour produire cet effet ; car cette glace est environnée à son tour par l'enceinte IKLM qui reçoit à elle seule l'action de l'air ; la glacé qu'elle renferme maintient l'enveloppe EFGH à la même température, et comme cette dernière enceinte ne communique pas avec la première, l'eau provenant du refroidissement du corps s'écoulera par le robinet O, et celle qui résulte de l'action de l'air extérieur sortira par le robinet N. Il faut avoir soin que la température de l'air soit de quelques degrés au-dessus de zéro, afin que la glace ait commencé à fondre : car si on l'introduisait sèche dans l'appareil, à la fin de l'opération la glace restant serait mouillée d'eau qui n'aurait pas pu s'échapper, ce qui produirait une erreur notable dans les résultats ; au lieu que si la fusion avait déjà commencé, elle serait mouillée au commencement de l'expérience comme à la fin, et toute l'eau provenant du refroidissement du corps s'écoulerait par le robinet O. Ainsi en introduisant dans le calorimètre un même poids de tous les corps à la même température, les capacités calorifiques de ces corps seront proportionnelles aux quantités d'eau que l'on recueillera par le robinet O ; mais pour obtenir ces nombres il n'est point du tout nécessaire d'opérer sur des masses égales et à la même température, il suffit de connaître exactement leur poids et leurs températures initiales, quelles qu'elles soient d'ailleurs ; en effet, M[rs] Laplace et Lavoisier ont reconnu que la capacité calorifique des corps était sensiblement constante, c'est-à-dire, qu'ils absorbent toujours la même quantité de chaleur pour élever leur température d'un même nombre de degrés du thermomètre ; par conséquent, en divisant la quantité de glace fondue par la température du corps à l'instant de son immersion dans le calorimètre, le quotient sera la quantité de glace qui aurait été fondue par un abaissement de température de 1°, et comme la quantité de chaleur abandonnée par un corps dans un abaissement quelconque de température est proportionnel à sa masse, en divisant la

quantité de glace fondue par le poids du corps, on aura celle qui aurait été fondue par l'unité de poids.

Quant aux substances liquides, comme il est indispensable de les renfermer dans des vases, il faudra soustraire de la quantité de glace fondue celle qui l'a été par le refroidissement du vase ; on obtiendra facilement cette dernière quantité par une expérience dans laquelle on ne mettrait dans la capacité centrale que le vase à la température du liquide qu'on y avait introduit.

La détermination des capacités calorifiques des gaz se ferait également au moyen de cet appareil ; mais, comme le volume de gaz que l'on pourrait loger dans le cylindre intérieur serait trop petit pour qu'il s'en dégageât la chaleur nécessaire à la fusion d'une quantité sensible de glace, il faudrait remplacer le cylindre A B C D par un serpentin qui circulerait dans l'enveloppe E F G H, et qui communiquerait au dehors par ses deux extrémités, afin que l'on puisse établir un courant de gaz dont on déterminerait exactement la température à l'entrée et à la sortie.

393. *Méthode des Mélanges.* Lorsque l'on mêle des poids égaux de deux liquides ou que l'on plonge dans un liquide un même poids d'un corps solide et qu'il ne se manifeste aucune action chimique, si les capacités calorifiques des corps mélangés sont les mêmes, la température commune du mélange sera la moyenne de celles des corps mêlés ; cette proposition est évidente, et c'est par ce moyen que l'on peut facilement vérifier que la capacité calorifique d'un même corps est constante ; car si l'on mêle deux poids égaux d'un même corps, par exemple, 1^k d'eau à 20° avec 1^k d'eau à 50°, on obtient 2^k d'eau à la température de 35° ; par conséquent, la chaleur qui s'est dégagée de la seconde masse pour passer de 50 à 35°, a été égale à celle qui a été absorbée par la première pour passer de 20 à 35° ; par conséquent, l'eau absorbe la même quantité de chaleur pour passer de 20 à 35° que de 35 à 50°.

Mais si les capacités calorifiques des corps mêlés n'étaient pas égales, la température finale ne serait pas moyenne entre celle des corps mêlés, et de l'observation de cette température on déduirait facilement le rapport des capacités calorifiques des corps mêlés. Par exemple, si on mêle 1^k



d'eau à zéro avec 1 k de mercure à 100°, la température du mélange sera 3°; par conséquent, la quantité de chaleur qui a été abandonnée par le mercure pour baisser sa température de 97° a élevé le même poids d'eau de 3°; la capacité calorifique de l'eau est donc à celle du mercure comme 97 : 3, ou comme 32,33 : 1.

Si les masses mêlées étaient inégales, en les désignant par m et m', par t et t' leur température, par T la température du mélange et par x et y la capacité calorifique des deux corps ou les quantités de glaces qui seront fondues par l'unité de masse se refroidissant de 1°, en supposant t plus grand que T, la chaleur perdue par le corps dont la masse est m, sera évidemment $m\,x\,(t-\mathrm{T})$, et la chaleur gagnée par l'autre sera de même $m'\,y\,(\mathrm{T}-t')$, et comme la seconde masse n'a gagné que ce que l'autre a perdu, il s'ensuit qu'on a l'équation $m\,x\,(t-\mathrm{T})=m'\,y\,(\mathrm{T}-t')$, d'où l'on peut facilement tirer la valeur de x ou de y.

La détermination des chaleurs spécifiques par le moyen des mélanges exige plusieurs corrections importantes, sans lesquelles on ne pourrait compter sur les résultats obtenus; la première est la chaleur absorbée par le vase, la seconde est relative au rayonnement qui a lieu pendant que le mélange s'effectue et qui diminue sa température. Quant à la première correction il faut évidemment connaître la quantité de chaleur absorbée par le vase, c'est ce que l'on peut faire par une observation préliminaire, dans laquelle on n'introduirait qu'un seul liquide, celui dont la capacité calorifique est donnée; connaisant son poids et sa température initiale, on en déduirait sa chaleur spécifique; alors désignant sa masse par m'', sa température initiale par t'', la chaleur gagnée par le liquide et le vase serait $m\,x\,(t-\mathrm{T})+m''\,(t''-\mathrm{T})$, et la chaleur perdue par l'autre corps serait toujours $m\,y\,(\mathrm{T}-t')$. En égalant ces deux expressions on aura une formule d'où l'on pourra, comme de la première, tirer la valeur de x ou de y.

Quant à la correction relative au rayonnement, elle serait difficile à trouver; mais on peut l'éviter d'une manière très-simple, en prenant les masses m et m' ou les températures, de manière que la température du mélange diffère peu de celle de l'air, et en opérant promptement le mélange.

La méthode des mélanges n'est évidemment applicable qu'à la détermination du calorique spécifique des liquides, des solides ou des vapeurs qui n'ont l'un sur l'autre aucune action chimique.

394. *Calorimètre de Rumfort.* Cet appareil consiste (*fig.* 259) en une caisse rectangulaire en cuivre mince, sur le fond de laquelle circule un tuyau également en cuivre dont les deux extrémités se prolongent au-

dehors de la caisse ; l'extrémité inférieure de ce serpentin est terminée par un entonnoir renversé P Q ; à la partie supérieure de la caisse se trouve une tubulure fermée par un bouchon à travers lequel passe un thermomètre à long réservoir. Cet instrument n'est applicable qu'à la détermination de la chaleur dégagée par la liquéfaction des vapeurs, et par la combustion des différentes substances. Pour cela on remplit la caisse d'eau à une certaine température, et on fait passer dans le serpentin le courant de vapeurs ou la fumée qui se dégage du combustible que l'on brûle sous l'entonnoir P Q, et on déduit la chaleur qui s'est dégagée au moyen du poids de l'eau de la caisse et de la température à laquelle elle a été élevée ; on doit tenir compte de la température du liquide ou du gaz qui sort par l'ouverture O ; et comme dans la méthode des mélanges, il faudra avoir égard à la chaleur absorbée par la caisse et le serpentin, et au rayonnement. Quant à cette dernière correction qui présente de très-grandes difficultés dans sa juste appréciation, M. de Rumfort est parvenu à la faire disparaître par un moyen extrêmement simple, qui consiste à mettre dans la caisse de l'eau à une température autant inférieure à celle de l'air que ce liquide doit être élevé au-dessus à la fin de l'opération ; alors pendant la moitié de l'expérience, l'air réchauffe la caisse, et pendant l'autre moitié c'est la caisse qui réchauffe l'air environnant, et comme ces deux effets contraires sont égaux, l'effet total du rayonnement de la caisse est nul. Pour parvenir à remplir la condition en question, il suffit d'arrêter l'opération lorsque le liquide de la caisse a dépassé la température de l'air d'un nombre de degrés égal à celui dont il lui était inférieur au commencement de l'expérience ; et si l'on n'était pas maître d'arrêter ainsi l'opération, par une expérience préliminaire, on déterminerait l'élévation totale de température du liquide et on déduirait facilement l'abaissement de température que l'on doit lui faire subir.

395. Indépendamment des procédés que nous venons d'indiquer, plusieurs physiciens en ont employé d'autres qui sont fondés sur les lois du refroidissement, et dont on s'est principalement servi dans les recherches sur la détermination des chaleurs spécifiques des gaz. Les limites

que nous nous sommes prescrites dans cet ouvrage ne nous permettent pas de les décrire.

396. *Résultats obtenus sur les Capacités calorifiques des Corps solides et liquides.*

CHALEUR spécifique de plusieurs Corps solides et liquides, rapportée à celle de l'Eau.

Eau	1,00000	Zinc	0,0927
Tôle ou fer battu	1,11051	Tellure	0,0912
Verre sans plomb	0,19290	Cuivre	0,0949
Mercure	0,02900	Nickel	0,1035
Oxide rouge de mercure	0,05011	Cobalt	0,1498
Plomb	0,02819	Soufre	0,20850
Oxide rouge de plomb	0,06227	Huile d'olive	0,30961
Étain	0,04754	Chaux vive du commerce	0,21689
Bismuth	0,0288	Acide sulfurique, pesanteur spécifique, 1,87058	0,33460
Or	0,0298	Acide nitreux fumant, pesanteur spécifiq., 1,2989	0,66139
Platine	0,0314		
Argent	0,0557		

Cette table indique les quantités relatives de glace qui seraient fondues par un même poids de ces différentes substances, en se refroidissant d'un même nombre de degrés, ou les quantités relatives de chaleur nécessaires pour élever un même poids de ces corps d'un même nombre de degrés du thermomètre. Pour en déduire la quantité absolue de glace qu'un poids déterminé de ces corps pourrait fondre en se refroidissant, il faut connaître cette quantité pour un poids connu d'eau ; or, d'après les expériences de Mrs Laplace et Lavoisier, 1k de glace à 75° du thermomètre centigrade, en se refroidissant à zéro, fond 1k de glace et fournit un égal poids d'eau à zéro ; ainsi 1k d'eau, en baissant de 1°, est capable de fondre $\frac{1}{75}$ de 1k, ou 0k,013333 de glace ; donc en multipliant les nombres du tableau précédent par ce dernier, on obtiendra les quantités de glaces qu'un kilogramme des différens corps pourra fondre en se refroidissant de 1°.

397. Les chaleurs spécifiques des corps solides ne sont pas rigoureuse-

ment constantes. Il paraît qu'elles augmentent avec la température, c'est-à-dire, que pour élever la température d'une même masse successivement d'un même nombre de degrés, il faut des qnantités de chaleur qui vont en croissant ; mais ces variations sont si faibles que dans presqne tous les cas on peut les regarder comme nulles.

398. Mrs Petit et Dulong ont découvert une relation extrêmement remarquable entre la capacité calorifique des corps solides simples : elle consiste en ce que si on multiplie ces capacités caloriques par le poids relatif des molécules, (en prenant celui de l'oxigène pour unité) (1), chacun de ces produits est un nombre constant égal à 0,37524. Ainsi lorsque l'on connaîtra le poids de la molécule d'un corps simple, on en déduira facilement sa chaleur spécifiqne, en divisant 0,37524 par ce nombre.

399. *Résultats obtenus sur les Chaleurs spécifiques des Gaz.*

Chaleur spécifique de différens Gaz et sous une même pression (2).

NOMS DES GAZ.	La Chaleur spécifique de l'Air étant prise pour unité.		La Chaleur spécifique de l'Eau étant prise pour unité.
	à volumes égaux.	à poids égaux.	
Air atmosphérique............	1,0000	1,0000	0,2669
Hydrogène....................	0,9033	12,3401	3,2936
Acide carbonique..............	1,2583	0,8280	0,2210
Oxigène.......................	0,9765	0,8848	0,2361
Azote.........................	1,0000	1,0318	0,2754
Oxide d'azote.................	1,3503	0,8878	0,2369
Hydrogène carboné............	1,5530	1,5763	0,4207
Oxide de carbone.............	1,0340	1,0805	0,2884
Vapeur d'eau..................	1,9600	3,1360	0,8470

La première partie du tableau n'a besoin d'aucune explication ; les nombres renfermés dans la seconde colonne expriment l'élévation de température qu'un poids quelconque de gaz produirait dans un égal poids

(1) Voyez pour la détermination des poids relatifs des molécules, la dernière partie du Cours de Chimie.

(2) Ce tableau est le résultat des observations de Mrs Delaroche et Berard.

d'eau en se refroidissant de 1° centésimal ; en divisant ces nombres par 75, on aura le poids de glace à 0° que ce même refroidissement ferait fondre, et en les divisant par 100, on aura le poids de l'eau à 0° qui pourrait être amenée à la température de l'ébullition.

400. ***Résultats des Observations faites sur les Capacités calorifiques des Vapeurs.*** Lorsqu'un liquide est en ébullition, les vapeurs qui se forment sont à la même température que le liquide, et renferment une certaine quantité de chaleur latente nécessaire à la constitution de leur état de vapeurs ; ces quantités de chaleur sont variables pour chaque espèce de vapeurs. Nous en donnons ici un tableau pour quelques vapeurs, d'après M. Deprets.

CHALEURS latentes de différentes Vapeurs sous la pression de 0,76, et à la température de l'ébullition.

NATURE des LIQUIDES.	TEMPÉRATURE de LEUR ÉBULLITION.	ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE que la chaleur de vaporisation pourrait donner à une masse égale d'eau.
Eau........................	100°	530° (1) — 550° (2) — 567° (3)
Essence de térébenthine.....	157°,4	76°,8
Ether sulfurique............	35°,5	172°
Alcool......................	78°,7	207°

Ainsi un poids donné d'eau, en se vaporisant à 100°, absorbe une quantité de chaleur capable d'élever le même poids à la température de 550°, ou, en d'autres termes, la chaleur qui se dégagerait de la liquéfaction de 1k de vapeurs d'eau, porterait 5k,50 d'eau de 0° à la température de l'ébullition.

401. La chaleur absorbée par la formation des vapeurs à toutes les tempé-

(1) M. Deprets.
(2) M. Clément.
(3) M. De Rumfort.

ratures, est la même pour le même poids de vapeurs. Ainsi pour évaporer 100[k] d'eau, quelle que soit la température, qu'elle dépasse ou soit en-dessous de celle de l'ébullition, il faudra toujours la quantité de chaleur nécessaire pour élever 550[k] de 0° à 100°; d'après cela, le tableau précédent donne les quantités de chaleur nécessaires à la vaporisation des liquides dans toutes les circonstances possibles de pression et de température. La loi que nous venons d'énoncer a été vérifiée par plusieurs physiciens; leurs résultats diffèrent en ce que les uns prétendent que, par la liquéfaction d'un même poids de vapeurs, on dégage toujours rigoureusement la même quantité de chaleur; les autres soutiennent que l'égalité ne subsiste que quand on retranche de la quantité totale de chaleur, celle que la vapeur a abandonnée en se contractant comme vapeur jusqu'à la température de la liquéfaction. Au reste, cette dernière quantité est toujours très-petite, relativement au calorique de liquéfaction de la vapeur, et cette divergence ne peut avoir aucune influence dans les applications.

D'après la première manière de voir, lorsqu'on élève la température d'une masse liquide renfermée dans un vase clos, la chaleur reçue est entièrement employée à former de nouvelles vapeurs qui pénètrent la première, augmentent sa force élastique, sa densité et sa température. Mais si une vapeur était chauffée sans être en contact avec un excès de liquide, elle tendrait à se dilater comme les gaz, et la température augmenterait par une certaine quantité de chaleur latente; dans ce cas les vapeurs ont une chaleur spécifique qui varie pour chacune d'elles: on n'a encore déterminé que celle de l'eau; elle est comprise dans le Tableau de Capacité calorifique des Gaz.

402. *Calorique de Liquidité.* De même que les corps liquides, pour se transformer en vapeurs, absorbent une certaine quantité de chaleur, les corps solides, pour se liquéfier en conservant leur température, rendent latente une quantité considérable de chaleur; c'est ce que nous avons déjà énoncé pour la glace.

Tableau du Calorique de Liquidité de plusieurs corps.

NOMS des SUBSTANCES.	TEMPÉRATURE de LEUR FUSION.	TEMPÉRATURE que le calorique absorbé donnerait à une masse d'Eau égale.
Eau..............................	100°	75°
Sperma-céti........................	56°	82°,222
Cire d'Abeilles....................	60°	97°,22
Etain..............................	219°	277°,777

D. *Phénomènes qui se développent dans les changemens d'état des Corps.*

403. *Passage de l'état solide à l'état liquide.* Lorsqu'une masse solide est soumise à l'action d'un foyer de chaleur, elle s'échauffe jusqu'à la température de sa fusion ; mais arrivée à ce terme, la température reste constante jusqu'à la fusion totale, parce que toute la chaleur émanée du foyer et reçue par le corps est employée à la liquéfaction et devient latente dans le liquide formé.

404. Mais si la liquéfaction des corps avait lieu par une action chimique, il se produirait un froid plus ou moins considérable, car un corps, pour passer à l'état liquide, absorbant beaucoup de chaleur qui devient latente dans ce nouvel état, si un foyer de chaleur ne fournit pas cette quantité de calorique, elle sera enlevée aux corps environnans dont par conséquent la température baissera. On conçoit maintenant pourquoi presque tous les sels, en se dissolvant dans l'eau, produisent du froid, et pourquoi un mélange de sel marin et de glace, qui par leur action chimique se fondent mutuellement, produit un froid si considérable : les effets de tous les mélanges frigorifiques sont fondés sur ce principe.

405. *Retour de l'état liquide à l'état solide.* Ce phénomène peut encore avoir lieu, ou par une source de froid, ou par une action chimique : dans

le premier cas, il y a permanence de température depuis le commencement de la congélation juqu'à la solidification totale de la masse ; dans le second cas, il y a émission de chaleur. Ainsi, par exemple, lorsqu'on place de l'eau dans une atmosphère à plusieurs degrés au-dessous de zéro, elle se congèle, mais la température de la glace est permanente tant qu'il reste encore de l'eau à congeler (1); ainsi lorsque l'on jette de l'eau sur la chaux vive, elle est solidifiée et il se développe une grande chaleur.

406. L'eau présente dans sa congélation différens phénomènes singuliers que nous devons examiner ici. Nous avons déjà dit que l'eau dont la température s'abaisse continuellement ne se contracte que jusqu'à 4° environ, et au-dessous de cette température le liquide se dilate toujours davantage jusqu'au terme de la congélation, époque à laquelle il prend subitement un grand accroissement de volume ; cet accroissement est de $\frac{1}{7}$ de son volume à zéro. Ce phénomène paraît en opposition avec la manière d'agir de la chaleur, car en général les corps augmentent de volume avec la température, et se contractent par le refroidissement. Cette anomalie singulière paraît s'expliquer d'une manière assez simple par la forme des cristaux de la glace. En effet, les molécules de l'eau ont la forme d'un octaèdre bi-pyramidal ; ces molécules, en se réunissant entre elles, doivent se grouper en nombre fini autour d'un point : il en résultera alors des polyèdres étoilés qui ne pourront grossir qu'en laissant entre les molécules qui viendront s'appliquer sur celles déjà réunies de très-grands espaces vides, et les cristaux qui se seront formés à une petite distance ne se réuniront que confusément, en laissant encore entre eux de grands espaces vides qui produiront nécessairement une grande diminution de densité ; de là on concevrait pourquoi l'eau ne cristallise jamais d'une manière régulière, et pourquoi les flocons de neige, dans lesquels on reconnaît d'une manière très-évidente la structure rayonnée des petits cristaux de glace, sont si légers. La plupart des autres liquides ne présentent pas les mêmes phénomènes, parce que leurs molécules étant des parallélipipèdes, ou pouvant se grouper de manière à en former, produisent des cristaux d'une grosseur indéfinie et semblables par une juxta-position continue de nouvelles molécules, et que les cristaux voisins se réunissent d'une manière régulière sans laisser entre eux de vides.

L'eau pure privée d'air par une récente ébullition et refroidie d'une manière

(1) Cela suppose toutefois que l'air froid agit immédiatement sur l'eau encore liquide, car si l'eau était séparée de l'air par une couche épaisse de glace, comme cette dernière ne conduit pas bien la chaleur, la partie supérieure pourrait se refroidir et envelopper de l'eau encore liquide.

continue, peut être amenée jusqu'à six degrés au-dessous de zéro sans se congeler, et même jusqu'à 12°, si sa surface est recouverte d'une légère couche d'huile; mais la présence du plus petit fragment de glace, ou le plus léger mouvement vibratoire, décide à l'instant la cristallisation, et le thermomètre remonte à zéro. L'explication de ce phénomène est assez simple. En effet, à zéro il y a équilibre entre les forces qui tendent à produire la congélation et celle qui retient la masse à l'état liquide; mais une très-petite force ne serait pas suffisante pour déterminer instantanément la congélation de toute la masse, parce que dans la congélation il y a émission de chaleur, et par conséquent il faudra nécessairement, pour que la congélation ait lieu au même instant dans toute la masse, qu'elle soit à une température assez basse au-dessous de zéro, pour que la chaleur dégagée par la congélation totale n'élève pas cette masse au-dessus de zéro. Ainsi donc la congélation ne peut avoir lieu subitement qu'autant que le liquide sera au-dessous de zéro. Mais elle peut avoir lieu partiellement à zéro, car alors la chaleur dégagée se dissipant lentement, la masse ne s'échaufferait pas, et pour cela il suffit ou de la présence de quelques fragmens de glace déjà formés, qui par leur attraction sur les molécules voisines les forcent à se réunir à eux, ou d'un mouvement vibratoire qui agitant inégalement le liquide, rapproche inégalement les molécules et établit des centres de cristallisation. Il est évident qu'un mouvement du liquide qui ne produirait pas un mouvement relatif des molécules, ne déciderait pas la cristallisation.

407. *Passage de l'état liquide à l'état de vapeurs.* Nous parlerons d'abord de l'évaporation par une source de chaleur. Lorsqu'un liquide renfermé dans un vase ouvert est soumis à l'action d'un foyer de chaleur, le liquide s'échauffe; sa surface émet une quantité croissante de vapeurs dont la force élastique augmente avec la température; et enfin, lorsque la force élastique de ces vapeurs peut soulever le poids de l'atmosphère, elles se forment dans l'intérieur même de la masse et s'élèvent en globules qui viennent crever à la surface. Ce phénomène a été nommé ébullition. Lorsque le liquide est arrivé à la température de l'ébullition, la température reste constante jusqu'à ce que toute la masse soit évaporée, et par conséquent toute la chaleur reçue du foyer est employée à former de la vapeur, et elle y est latente, car la vapeur est à la même température que le liquide. Ce phénomène est analogue à celui que présente la fusion des corps solides.

408. L'ébullition d'un liquide ayant lieu lorsque la force élastique de

ses vapeurs est égale à la pression atmosphérique, il en résulte que la température de l'ébullition doit suivre les variations du baromètre ; mais comme ces variations sont très-faibles, elles ne produisent pas ordinairement des changemens bien sensibles dans cette température ; ce n'est que dans le cas où le liquide est contenu dans un vase fermé de toute part et dont l'air a été fortement raréfié ou condensé, que l'on voit s'élever ou s'abaisser la température de l'ébullition. Ainsi dans un vide parfait, l'eau bouillirait au-dessous de zéro : à la vérité, on ne peut jamais vérifier ce fait, car la vapeur que l'eau émet dans le vide instantanément forme une atmosphère artificielle, et élève par conséquent la température de l'ébullition ; mais en évacuant continuellement ces vapeurs au moyen d'une bonne machine pneumatique, on parvient facilement à faire bouillir l'eau à une très-basse température, d'autant plus que dans le même temps on absorbe une plus grande masse de vapeurs ; on peut également par ce procédé faire bouillir de l'éther à la température ordinaire. Au contraire, en soumettant à l'action de la chaleur un liquide renfermé dans un vase clos, la vapeur qui se forme continuellement augmente la force élastique de l'atmosphère intérieure qui pèse sur l'eau, et retarde continuellement la température de l'ébullition, jusqu'à une certaine limite pour chaque liquide, au delà de laquelle la totalité de la masse liquide se transforme en vapeurs d'une extrême densité, qui occupent toute la capacité du vase.

La force élastique des vapeurs qui se forment dans des vases clos, croissant avec une grande rapidité à mesure que la température s'élève (Voyez le 2e tableau de la page 301), et augmentant indéfiniment avec la température, il en résulte que les vases clos dans lesquels on soumet des liquides à l'action de la chaleur doivent être très-forts et capables de supporter une grande pression. Mais, quelle que soit leur résistance, si rien ne limite la température à laquelle le vase peut être élevé, il arrivera nécessairement une époque à laquelle la force expansive de la vapeur l'emportant sur la résistance du vase, le briserait avec une violente explosion et projetterait au loin ses débris. Pour limiter la température que doit recevoir le vase, on emploie différens procédés que

nous allons décrire. Le plus simple et le plus souvent employé consiste en une soupape adaptée à la partie supérieure du vase et qui est pressée de dehors en dedans par un ressort ou un poids dont la force est égale à la pression que la vapeur exerce de dedans en dehors, à la température que l'on ne veut pas dépasser ; pour peu que la température excède cette limite, la soupape est soulevée, la vapeur s'échappe, et sa force élastique devient stationnaire, parce que la vitesse avec laquelle elle se dégage sous une petite pression est très-grande (1). La figure 260 représente la coupe d'une soupape de sûreté dans sa plus grande simplicité ; elle est composée d'un bouchon conique qui entre à frottement libre dans une ouverture de même forme ; la tige *mn*, qui passe à travers la branche horizontale du cadre *abcd*, sert à régler le mouvement de la soupape et à recevoir les poids dont elle doit être chargée (2). Quelquefois, outre les soupapes de sûreté, on pratique sur la surface des chaudières des ouvertures circulaires sur lesquelles on soude des plaques d'alliage fusible à la température que l'on ne veut pas dépasser.

409. On emploie souvent dans les laboratoires un appareil désigné sous le nom de *Marmite de Papin*. Cet appareil, dont on se sert pour soumettre des corps dans l'eau ou un liquide quelconque à une très-haute température, est composé (*fig.* 261) d'un vase de fonte ou de cuivre ABCD, terminé supérieurement par un rebord sur lequel s'applique un couvercle M pressé par une vis dont l'écrou est percé dans un cadre de fer qui

(1) La vitesse de l'écoulement de la vapeur, sous une pression égale à celle de l'atmosphère, est de 590 mètres par seconde, de sorte que par une ouverture d'un centimètre carré il s'écoulerait par seconde 59 mètres cubes de vapeurs.

(2) Dans les chaudières des machines à vapeur, les soupapes sont pressées au moyen d'un lévier mobile autour d'une de ses extrémités, qui appuye sur la soupape par la partie moyenne, et dont l'autre extrémité est chargée d'un poids dont on fait varier l'effet en changeant sa position sur la tige.

Le calcul du poids de la soupape, dans chaque cas particulier, est extrêmement simple. Supposons, par exemple, que l'on veuille fournir de la vapeur à la température de 200° ; sa force élastique, d'après le deuxième tableau de la pag. 301, est de 23 atmosphères. Si la soupape a un centimètre carré, la pression de la vapeur sera égale au poids d'une colonne de mercure ayant $0^{m},01$ de base et $23 \times 0^{m},76$ de hauteur ou 17,48 centimètres dont le volume est 17,48 centimètres cubes. Or, comme 1 centimètre cube d'eau pèse 1 gramme, et que la densité du mercure est 13,56, il en résulte qu'un centimètre cube de mercure pèse $13^{g},56$, et, par conséquent, que le poids de la soupape doit être de $17,48 \times 13^{g},56 = 2^{k},726$.

s'engage par ses extrémités sous les rebords A et B du vase; le couvercle est garni d'une soupape de sûreté *a*.

410. La marmite autoclave est encore une machine destinée à soumettre les liquides à une haute température; elle ne diffère de la marmite de Papin que par le mode d'application du couvercle. Cette marmite est cylindrique et percée supérieurement (*fig.* 262) d'une ouverture elliptique ABCD; le couvercle, de même forme, a ses deux axes plus grands d'un ou deux centimètres; on l'introduit dans la chaudière en présentant son petit diamètre C'D' au grand diamètre AB de la marmite; on le retourne et on l'applique contre les bords inférieurs de l'ouverture; les deux petits arrêts *m* et *n* servent à le maintenir dans cette position; aussitôt que la vapeur se forme dans la marmite, elle serre le couvercle par sa force élastique, et la fermeture est d'autant plus parfaite que la vapeur a une plus grande tension.

411. Nous avons dit que lorsque l'on échauffait un liquide renfermé dans un vase clos, l'atmosphère de vapeur qui se formait retardait continuellement l'ébullition jusqu'à une certaine température, à laquelle toute la masse se transformait en vapeurs. Ce fait remarquable a été constaté par M. Cagniard de la Tour; les expériences ont eu lieu dans des tubes de verre fermés à la lampe. Il a reconnu, par une série d'observations faites avec beaucoup de soin, que l'éther se vaporisait en vase clos à 150° dans un espace moindre que le double de son volume, et produisait une pression de 70 atmosphères; que le sulfure de carbone se vaporisait à 210° en produisant une pression de 37 atmosphères. L'alcool et l'eau ont présenté les mêmes phénomènes; la température du changement d'état n'a point été déterminée, mais il a reconnu que le premier de ces liquides produisait une pression de 119atmosphères en se vaporisant dans un espace à peu près trois fois plus grand, et le second a presque toujours brisé les tubes dans lesquels il a été vaporisé : à cette haute température l'eau a dépoli le verre en s'emparant de l'alcali qu'il renferme (1).

(1) L'appareil employé pour mesurer les pressions et les températores de ces vapeurs, était composé de deux tubes de verre disposés comme dans uo baromètre à siphon dont les deux extrémités étaient exactement fermées. La branche la plus courte renfermait du mercore et le liquide; la plus longue était pleine d'air; l'appareil était chauffé dans un bain d'huile ou de mercure doot on mesurait la température avec uo thermometre à mercore ou à air. La pression se mesurait par le raccourcissement de la colonne d'air, au moyen de la loi de Mariote et de la loi de M. Gay-Lussac. Ces expériences présentent beaucoup de danger, à cause de la rupture fréquente des tubes; l'appareil doit être renfermé dans des cages de toile métallique, et il est prudent de se servir de masques de verre.



412. Il nous reste maintenant à examiner les phénomènes qui accompagnent la vaporisation des liquides qui ne sont point soumis à l'action d'un foyer de chaleur, et qui a lieu par la tension qu'ils possèdent à toutes les températures. Il est évident que la vaporisatinn, dans le cas que nous considérons, abaissera la température de la masse liquide; car les vapeurs renfermant une grande quantité de calorique latent, ce calorique devra être pris et dans le liquide et dans les corps environnans. Si l'air, par son contact, et les corps environnans, ne lui communiquaient pas continuellement de la chaleur, le refroidissement du liquide pourrait être indéfini; mais la température devient stationnaire lorsque la perte de chaleur due à l'évaporation se trouve compensée par le rayonnement des corps extérieurs et la communication directe de l'air. Un grand nombre d'expériences constatent ces résultats théoriques. Lorsque l'on met sur la main des corps très-volatils, tels que de l'alcool, de l'éther, leur vaporisation est accompagnée d'une sensation de froid. Lorsque l'on environne la boule d'un thermomètre d'une petite éponge ou d'amadou imbibé d'un liquide volatil, le thermomètre descend d'un grand nombre de degrés; le refroidissement serait encore bien plus considérable, si l'instrument était placé sous le récipient d'une machine pneumatique, duquel on absorberait continuellement les vapeurs, parce que dans le même temps il s'en formerait une bien plus grande quantité; on obtient le même effet en plaçant les thermomètres dans un courant d'air, ou en les fixant à l'extrémité d'une fronde que l'on fait tourner rapidement: nous verrons plus tard la cause de l'influence d'un courant d'air sur la vaporisation spontanée. Le procédé qui est usité en Egypte et en Espagne pour rafraîchir l'eau, est fondé sur le froid produit par l'évaporation spontanée; on emploie des vases poreux à travers lesquels l'eau suinte lentement et présente à l'extérieur une grande surface humide qui facilite son évaporation aux dépens de la température du vase et de l'eau qu'il renferme. On obtient le même résultat en exposant à l'air des vases métalliques pleins d'eau et recouverts de linges mouillés; le refroidissement est beaucoup plus rapide en plaçant le vase dans un courant d'air, ou en l'attachant à une machine qui se meut

avec rapidité, comme l'aile d'un moulin à vent. Nous terminerons l'énumération des faits qui viennent à l'appui du phénomène dont il est question, par l'exposé de la belle expérience de M. Leslie, dans laquelle ce célèbre physicien est parvenu à congeler l'eau par le refroidissement provenant de l'évaporation spontanée. L'appareil de M. Leslie consiste en une large capsule de verre ou de porcelaine remplie d'acide sulfurique concentré; au-dessus se trouve une capsule métallique très-plate, pleine d'eau, soutenue par trois pieds qui s'appuyent contre les bords de la capsule de verre; l'appareil est placé sous le récipient d'une bonne machine pneumatique dans lequel on fait le vide; l'acide sulfurique, ayant une très-grande affinité pour l'eau, s'empare de la vapeur à mesure qu'elle se forme, de sorte que l'émission de vapeur étant presque aussi rapide que si l'espace vide était indéfini, dans un temps très-court, l'abaissement de température de l'eau est suffisant pour la congeler. M. Gay-Lussac est parvenu par ce moyen à congeler le mercure, en entourant d'un mélange frigorifique l'appareil dans lequel la vapeur aqueuse était produite et absorbée.

413. *Évaporation.* Après avoir examiné les phénomènes généraux qui accompagnent la transformation des liquides en vapeurs dans toutes les circonstances, nous allons de nouveau examiner la vaporisation des liquides, mais sous le rapport de la quantité de vapeurs formées dans un temps donné. Ces considérations sont d'une très-haute importance dans un grand nombre d'arts et dans les phénomènes météorologiques.

414. L'évaporation à la température de l'ébullition dans un vase ouvert, ne dépend que de la quantité de chaleur reçue par le liquide, et cette quantité dépend de celle du combustible consommé et de la portion de la surface de la chaudière qui reçoit l'action directe du foyer: le poids du liquide renfermé dans la chaudière et la grandeur de son ouverture (à moins qu'elle ne soit extrêmement petite) n'ont aucune influence. On a reconnu par de nombreuses expériences, qu'une chaudière en cuivre de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, produit par heure de 45 à 50 kilogrammes de vapeurs par mètre carré de surface, exposée au feu d'un foyer ordinaire dans lequel on brûle 6 à 7 kilogrammes de charbon de terre par heure.

415. L'évaporation d'un liquide à l'air à la même température et par le seul effet de la tension du liquide, dépend de la température et de la quantité de vapeurs qui se trouve déjà dans l'air : si l'air était saturé de vapeurs, l'évaporation serait nulle ; s'il était parfaitement sec, elle serait la plus grande possible à cette température. En général, si la masse d'air a une étendue indéfinie, ou du moins très-grande relativement à la masse liquide, l'évaporation est proportionnelle à la tension du liquide diminuée de celle de la vapeur déjà existant dans l'air. Si la masse d'air était très-petite, la vapeur qu'elle reçoit la rapprochant continuellement du point de saturation, l'évaporation irait évidemment en diminuant. Si l'air était fortement agité, l'évaporation serait beaucoup plus active ; pour en concevoir la raison, il faut remarquer que lorsqu'un liquide est en contact avec de l'air en repos, la couche d'air qni est à la surface du liquide se sature rapidement de vapeurs ; si cette couche restait immobile et conservait la vapeur qu'elle a reçue, l'évaporation s'arrêterait ; mais ces couches saturées s'élèvent par leur légèreté spécifique, et peut-être une portion de la vapeur s'en sépare pour se porter dans les couches supérieures, de sorte que la vapeur reçue par l'air en contact se dissipe et l'évaporation continue ; mais comme ce mouvement de la vapeur est très-lent, l'évaporation l'est également ; on conçoit d'après cela que si l'air est agité, les couches en contact avec le liquide étant continuellement renouvelées, la cause de retard de l'évaporation que nous venons de décrire sera d'autant plus diminuée que l'agitation de l'air sera plus grande, et l'évaporation devra devenir beaucoup plus rapide, et même atteindre celle qui aurait lieu dans le vide. Cette activité de l'évaporation par les courans d'air se vérifie tous les jours sous nos yeux : nous avons donné précédemment, à l'occasion du refroidissement produit par l'évaporation dans un courant d'air, quelques expériences qui viennent à l'appui de ce fait. Le maximum de froid aura lieu lorsque le calorique absorbé par la vapeur sera égal à celui que perd l'air pour se mettre en équilibre avec elle, plus à celui qui est versé sur la surface liquide par les corps environnans.

416. Si l'air calme se trouvait à une température plus élevée que le liquide, l'évaporation se ferait plus rapidement et d'autant plus que la

différence de température serait plus grande, parce que la diffusion de vapeurs se ferait en moins de temps, et que l'air admettrait une plus grande quantité de vapeurs pour sa saturation. Quant à l'effet de l'air chaud se renouvellant continuellement, M. Gay-Lussac a fait une série d'expériences qui, quoique ayant pour objet d'observer le refroidissement, indiquent nécessairement une évaporation croissante avec le refroidissement et font voir que l'évaporation par un courant d'air chaud augmente avec la température, mais moins rapidement. Dans les expériences de M. Gay-Lussac, l'air était chassé par un gazomètre à pression constante ; il se desséchait en passant à travers un tube renfermant du chlorure de calcium, de là il passait dans un autre tube où se trouvait un thermomètre qui en donnait la température, puis était lancé sur la boule d'un thermomètre recouvert d'une batiste légère humide. Voici les résultats obtenus par ce savant physicien :

TEMPÉRATURE DE L'AIR sous la pression de 0m,76.	ABAISSEMENT DE TEMPÉRATURE au-dessous de la température ordinaire.	TEMPÉRATURE DE L'AIR sous la pression de 0m,76.	ABAISSEMENT DE TEMPÉRATURE au-dessous de la température ordinaire.
0°	5,82	13°	10,07
1	6,09	14	10,44
2	6,37	15	10,82
3	6,66	16	11,20
4	6,96	17	11,58
5	7,27	18	11,96
6	7,59	19	12,34
7	7,91	20	12,73
8	8,26	21	13,12
9	8,61	22	13,51
10	8,97	23	13,90
11	9,37	24	14,30
12	9,70	25	14,70

417. Enfin, si le liquide se trouvait à une température constante et plus élevée que l'air environnant, calme ou constamment au même degré d'agitation, M. Dalton a trouvé que la quantité de vapeurs fournies dans le même temps était proportionnelle à la tension du liquide. Dans ce cas, l'état hygrométrique de l'air n'a pas d'influence sensible, parce que la tension de la vapeur en dissolution dans ce fluide est très-petite relativement à

celle que produit le liquide, lorsque la différence de température de l'air et du liquide est considérable ; mais quand cette différence est nulle ou très-légère, l'influence de l'état hygrométrique de l'air sur l'évaporation devient sensible, et les quantités de vapeurs fournies dans le même temps sont alors proportionnelles à la différence de tension du liquide et de la vapeur en dissolution dans l'air. Les résultats obtenus par M. Dalton sont consignés dans le tableau suivant.

TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR.	ÉVAPORATION PAR MINUTE.
100	0,76	1,02
82,2	0,38	0,96
73,3	0,26	0,64
66,6	0,19	0,55
58,8	0,13	0,32

418. Dans tous les cas possibles d'évaporation par le seul contact de l'air, l'évaporation est proportionnelle à la surface en contact avec ce fluide.

419. Lorsqu'une masse de liquide est soumise dans une chaudière à l'action d'un foyer d'une petite dimension relativement à celle de la chaudière, il peut arriver que la température du liquide ne s'élève point jusqu'à la température de l'ébullition : et si le foyer est constant, le liquide atteint aussi une température constante qu'il ne dépasse plus. Ce fait, que l'on a souvent occasion d'observer, tient à ce que le liquide en s'échauffant émet une quantité croissante de vapeurs qui absorbent des quantités croissantes de chaleur ; s'il arrive que cette chaleur devienne égale à celle que le liquide reçoit du foyer, avant que la température ait atteint 100°, il est évident que la température du liquide deviendra stationnaire. Dans ce cas, la dépense de combustible pour évaporer une quantité donnée de liquide est la même que dans le cas de l'ébullition (401). Il résulte de là un moyen très-simple d'évaporer un liquide quelconque à une température inférieure à celle de son ébullition, en proportionnant la grandeur de la chaudière à celle du foyer ; il faudrait, en outre, agiter souvent le liquide pour répartir également la chaleur.

420. En résumant ce qui précède, l'évaporation de la même quantité de liquide, dans toutes les circonstances possibles, absorbe la même quantité de chaleur. Lorsque l'évaporation a lieu par un foyer de chaleur, c'est lui qui fournit celle que la vapeur rend latente; dans toutes les évaporations spontanées, elle est fournie par la masse liquide et les corps environnans. L'évaporation par la chaleur est proportionnelle à la quantité de chaleur reçue par la chaudière, et cette quantité, dans les mêmes circonstances, est proportionnelle à la partie de la surface de la chaudière en contact avec le foyer; l'influence de l'air n'est sensible que lorsque la température du liquide est peu élevée; lorsque le foyer n'est pas suffisant pour élever la masse liquide à la température de l'ébullition, la température constante qu'acquiert le liquide est en raison inverse de sa surface libre; pour une même surface de liquide échauffé à une température constante, l'évaporation est en raison directe de la tension du liquide. Quant à l'évaporation spontanée, elle croît avec l'étendue de la surface liquide, avec la température de l'air et du liquide, la dessiccation de l'air, la diminution de sa force élastique, et son agitation; dans les mêmes circonstances d'agitation ou de repos et de force élastique, la quantité de liquide évaporé est proportionnelle à la différence entre la tension du liquide et la tension hygrométrique de l'air.

421. Il y a encore deux circonstances de vaporisation, dont nous n'avons point parlé, qui sont: 1° la diminution ou l'anéantissement de la grande pression à laquelle plusieurs corps doivent leur liquidité: tels sont les acides hydro-chlorique, hydro-sulfurique, carbonique, sulfureux, etc; la vaporisation spontanée de ces liquides produit beaucoup de fruid. Dans l'article suivant nous indiquerons les procédés qu'il faut employer pour produire les pressions nécessaires à la liquéfaction de ces corps; 2° les actions chimiques; à cet égard on ne peut rien dire de général, parce que l'action chimique, produisant toujours de la chaleur, fait souvent disparaître le fruid qui résulte de la vaporisatiun.

422. *Retour des vapeurs à l'état liquide.* Lorsque l'espace occupé par une vapeur en est saturé, le plus petit abaissement de température ou la plus légère augmentation de pression suffit pour en faire repasser une partie à l'état liquide; mais si cet espace n'était point

saturé, la vapeur pourrait supporter sans se liquéfier un abaissement plus ou moins grand de température et une augmentation plus ou moins considérable de pression, et dans ces changemens sa force élastique suivrait la loi de Mariote (286) et la loi de M. Gay-Lussac (382). L'espace occupé par une vapeur peut ne pas être saturé, parce qu'ayant été saturé originairement, la température a augmenté, ou que la pression a diminué, ou enfin par l'augmentation de température et la diminution simultanée de la pression. C'est ainsi, par exemple, qu'un espace saturé de vapeurs d'eau à 100° et sous la pression de $0^m,76$, et non en contact avec de l'eau liquide, cesserait de l'être, si la température montait à 300°, ou si la pression se réduisait à $0^m,50$, ou si ces deux effets avaient lieu à la fois. Il résulte de là que s'il existait des liquides dont l'ébullition, sous la pression de $0^m,76$, eût lieu à une température très-basse, par exemple, de 100° au-dessous de zéro, l'espace saturé de vapeurs à cette température, amené à des températures supérieures à zéro, renfermerait de la vapeur extrêmement raréfiée, qui ne pourrait passer en partie à l'état liquide que par un abaissement de température de 100° au-dessous de 0°, ou par une pression qui lui donnerait la même densité (1), ou par l'effet simultané de ces deux causes. Il paraît que le cas que nous venons de supposer est celui de tous les gaz que nous avons désignés sous le nom de permanens; car un grand nombre d'entre eux ont été liquéfiés par une forte pression et un grand abaissement de température; et il est très-probable que si, jusqu'ici, les autres n'ont pas été ramenés à l'état liquide, c'est que les moyens de compression ou de refroidissement n'ont pas été assez puissans. Ainsi, nous devons regarder les gaz comme des vapeurs très-dilatées, dans les circonstances ordinaires de pression et de température,

---

(1) Il est évident que, par l'effet seul de la pression, l'on pourrait liquéfier une vapeur soumise à une température beaucoup plus élevée que celle de son ébullition : car l'eau, l'alcool, l'éther, restant en partie à l'état liquide, en vase clos, à une température beaucoup plus élevée que celle de leur ébullition, il est probable que, si l'espace libre au-dessus du liquide avait été plus petit, la vaporisation totale n'aurait eu lieu qu'à une température plus élevée; et, par conséquent, quelle que soit la température d'une vapeur, par une pression suffisante, qui cependant ne réduirait pas le volume à celui que devrait occuper le liquide, on pourra la faire repasser en partie à l'état liquide.

et qui seraient fournies par des liquides dont l'ébullition n'aurait lieu, sous des pressions beaucoup plus grandes que celle de $0^m,76$, qu'à des températures beaucoup plus basses que les températures ordinaires (1).

D'après ce qui précède, les vapeurs peuvent se condenser par une source de froid ou par la pression. Par une source de froid, il doit se développer des phénomènes absolument contraires à ceux que nous avons reconnus dans la formation des vapeurs au moyen de la chaleur. Or nous avons observé qu'à toutes les températures, celle du liquide était égale à celle de la vapeur qu'il formait ; par conséquent, le liquide provenant de la condensation de la vapeur devra se refroidir en même temps qu'une nouvelle condensation aura lieu, de sorte qu'à chaque instant la quantité de vapeurs non condensées sera égale à celle que le liquide pourrait former à cette température. C'est ce que d'ailleurs on peut démontrer directement ; en effet, à chaque instant la vapeur qui se précipite a nécessairement la même température que celle qui reste à l'état gazeux ; si le liquide ne se refroidissait pas à mesure que de nouvelles vapeurs se condensent par le refroidissement, il en émettrait de nouvelles jusqu'à ce que l'équilibre de température se fût établi. Lorsqu'une vapeur est saturée, c'est-à-dire qu'elle a la densité qui convient à sa température, la liquéfaction a lieu par le plus faible abaissement de température ; mais si une vapeur non saturée était soumise à un foyer de froid, elle se refroidirait d'abord sans se condenser jusqu'à la température à laquelle sa force élastique serait égale à la tension qu'aurait le liquide dans les mêmes circonstances, après quoi le plus faible abaissement de température en ferait passer une partie à l'état liquide. Il résulte de là que, par le refroidissement, on ne peut jamais condenser complètement une vapeur, et que l'espace dans lequel se fait la condensation est toujours saturé de vapeurs d'une tension et d'une densité correspondantes à la température du liquide condensé, et par conséquent que le poids de la vapeur non

(1) Il résulte de là que la loi de dilatation des gaz de M. Gay-Lussac et la loi de Mariote se trouveraient en défaut pour les pressions ou les températures où les gaz commenceraient à se liquéfier.

condensée est proportionnel, toutes choses égales d'ailleurs, à l'espace qu'elle occupe.

423. Dans la condensation des vapeurs par la pression, il faut, comme précédemment, distinguer les vapeurs saturées et celles qui ne le sont pas. Lorsqu'une vapeur est saturée, sa liquéfaction commence par la plus faible augmentation de pression ; mais dans le cas contraire elle ne commence que lorsque, par la diminution de volume, l'espace est saturé à cette température. Si la force élastique de la vapeur est très-petite, relativement à la tension du liquide à cette température, la pression devra être très-grande pour obtenir un commencement de liquéfaction. Il serait extrêmement difficile de condenser des vapeurs par une pression directe, parce que, en se comprimant, elles dégagent beaucoup de chaleur ; il faudrait que la pression fût très-lente, afin que la chaleur pût se dissiper à mesure qu'elle se développerait.

Nous indiquerons ici sommairement les expériences qui ont été faites pour liquéfier plusieurs corps que l'on regardait comme des gaz permanens.

L'appareil employé par M. Faraday, qui le premier est parvenu à condenser un grand nombre de gaz, consiste en un tube de verre courbé en arc de cercle, fermé par une de ses extrémités et ouvert par l'autre ; on introduit par cette extrémité les substances qui, par leur réaction, doivent fournir le gaz que l'on doit condenser, mêlées si elles n'agissent que par l'action de la chaleur, et séparées au moyen d'une petite lame de platine, si elles agissent à froid ; on les pousse jusqu'à l'extrémité fermée ; si l'une des substances était liquide, on l'introduirait d'abord au moyen d'un tube qui plongerait jusqu'à l'extrémité, pour éviter qu'il n'en reste le long du tube ; ensuite on ferme à la lampe l'extrémité ouverte du tube ; on la plonge dans un mélange frigorifique et on fait agir les substances placées à l'autre extrémité, ou en les mêlant par l'agitation ou en les faisant chauffer ; le gaz qui se dégage se comprime et bientôt se condense dans la partie du tube plongée dans le mélange frigorifique. M. Faraday a obtenu ainsi de l'acide sulfureux liquide à 7°,2, sa vapeur exerçait une pression de 2 atmosphères ; de l'hydrogène sulfuré liquide, qui à la température de 10° exerçait une pression de 17 atmosphères ; de l'acide carbonique liquide, dont la tension à 0° est de 36 atmosphères ; du protoxide d'azote liquide, dont la tension à 7°,2 est de 50 atmosphères ; du cyanogène liquide, dont la tension à 7°,2 est de 3,6 à 3,7 atmosphères ; de l'ammoniaque liquide, dont la tension à 10° est de 5,6 atmosphères ; de l'acide hydro-chlorique liquide, dont la tension à la tempéra-

ture de 10° est de 40 atmosphères ; du chlore liquide, dont la tension à 15°5 est de 4 atmosphères ; enfin, de l'oxide de chlore liquide, dont la force élastique n'a point été déterminée. Quelques-uns de ces liquides, et principalement l'acide carbonique, brisent souvent avec de violentes explosions les tubes de verre dans lesquels ils sont renfermés ; lorsque les tubes ont résisté et qu'on les ouvre en brisant une de leurs extrémités, la vapeur comprimée s'échappe avec violence, souvent avec explosion ; quelquefois le liquide disparaît instantanément, et lorsque sa tension n'est pas très-grande, une partie seulement se vaporise et le froid qui se produit maintient le reste à l'état liquide.

M. de Bussy est parvenu depuis à liquéfier l'acide sulfureux, le chlore, l'ammoniaque et le cyanogène en faisant arriver ces gaz desséchés dans un ballon environné d'un mélange frigorifique, à 18 ou 20° au-dessous de zéro.

424. L'eau qui tombe de l'atmosphère sous toutes les formes provient de la vapeur condensée par le refroidissement. D'après M. de Saussure, la vapeur existe dans l'air sous deux formes différentes, en dissolution transparente et en petites vésicules creuses qui constituent les nuages. Cet habile physicien a reconnu la forme sphérique des globules d'eau qui constituent les nuages, en les observant avec de fortes lentilles, et il a cru devoir conclure qu'ils étaient creux, de la grande facilité et de la légèreté avec lesquelles ils se meuvent dans l'air.

Cette constitution des globules de vapeurs n'est cependant pas suffisante pour expliquer la suspension des nuages dans l'atmosphère, car le fluide qu'ils renferment ne peut être que de l'air ou de la vapeur d'eau, ou tous les deux ; mais dans le cas le plus favorable, le fluide intérieur doit avoir la même élasticité que l'air extérieur, et la différence de densité de ce fluide avec l'air ne peut pas compenser le poids de l'enveloppe. M. Fresnel a donné une explication de la suspension des nuages qui paraît très-probable et qui est applicable aux globules vésiculaires, à des globules pleins, et même à des globules solides ; elle est fondée sur ce que l'air se laisse facilement traverser par le calorique rayonnant et ne s'échauffe que quand il est en contact avec des substances solides ou liquides qui l'absorbent rapidement ; il résulte de là que les globules d'eau, vides ou pleins, liquides ou solides qui composent un nuage, en s'échauffant par l'action du soleil et de la terre,

échauffent les couches d'air qui les environnent et forment un tout plus léger que l'air ; à la vérité, l'air interposé entre les globules pourra communiquer une partie de sa chaleur à l'air extérieur et même se dégager ; mais cet effet sera très-lent, à cause de la capillarité des espaces qui séparent les globules. On concevrait aisément, d'après cela, l'abaissement des nuages pendant la nuit et leur ascension par l'action du soleil. Les brouillards sont des nuages suspendus à la surface de la terre. La pluie est produite par un refroidissement subit des nuages qui provient ordinairement d'un vent à une plus basse température (1). La neige provient d'une condensation par une température inférieure à la congélation ; les flocons, en se rencontrant dans leur chute, se réunissent et forment souvent de petites masses régulières à six rayons également inclinés. Nous avons parlé de la rosée et de la gelée blanche (370) ; nous examinerons plus tard, et en leur lieu, les autres phénomènes météorologiques.

425. Les vapeurs peuvent encore se liquéfier par des actions chimiques ; cette condensation produit nécessairement du froid, mais l'action chimique produisant de la chaleur, fait souvent disparaître cet effet.

E. *Usage du changement d'état des corps comme force motrice.*

426. Jusqu'ici on n'a employé comme force motrice des différentes machines dont l'on fait usage dans les arts, que les courans d'eau, d'air, la force des animaux et celle qui se développe dans la vapeur d'eau et s'anéantit par son retour à l'état liquide. Comme les machines à vapeur sont maintenant d'une importance extrême dans presque toutes les branches de l'industrie, nous donnerons quelques détails sur la manière d'agir de la vapeur dans ces appareils, et nous décrirons sommairement une de ces machines.

---

(1) Un grand nombre d'observations démontrent d'une manière évidente que la quantité d'eau qui tombe annuellement sur une même étendue, croît à mesure que l'on s'approche davantage de l'équateur ; mais en général cette quantité d'eau croissante se trouve répartie sur un plus petit nombre de jours pluvieux ; à Paris la quantité d'eau moyenne annuelle est de $0^{m},33$.

Concevons un cylindre métallique creux à base circulaire, fermé par le bas et ouvert par le haut, et dans ce cylindre un piston qui puisse se mouvoir librement, parcourir toute sa hauteur, et qui soit d'abord placé à la partie inférieure du cylindre. Si, par un moyen quelconque, on introduit de la vapeur au-dessous du piston, par sa force élastique le piston montera à la partie supérieure du cylindre. Supposons que, le piston arrivé au sommet de son ascension, la vapeur soit condensée par un abaissement subit de température, l'espace situé au-dessous deviendra vide, et la pression de l'air, agissant sur le piston, le ramènera à sa position primitive. Il est évident qu'en réitérant l'introduction et la condensation de la vapeur, il en résultera un mouvement alternatif du piston, que l'on pourra communiquer à une machine quelconque. Dans les premières machines, la vapeur arrivait directement d'une chaudière à la partie inférieure du cylindre par un tuyau armé d'un robinet qui restait ouvert pendant l'ascension du piston et fermé pendant sa descente, et la condensation s'opérait par une injection d'eau froide qui avait lieu dans le cylindre. Depuis on a fait à ces appareils de grandes améliorations, dues à Wat et à Woolf. Le premier a fermé le cylindre dans lequel se meut le piston, et a fait agir successivement la vapeur en dessus et en dessous du piston; par conséquent, la pression de l'atmosphère n'a plus aucune influence sur le mouvement; et il a fait la condensation dans un espace particulier séparé du cylindre, désigné maintenant sous le nom de *condenseur*; enfin, au moyen d'une pompe mise en mouvement par la machine elle-même, il enlève du condenseur non-seulement l'eau qui s'y trouve, mais encore l'air qui existait primitivement dans l'eau qui s'est dégagée avec la vapeur, et qui devient libre après la condensation. Ces machines portent le nom de machines à double effet, en opposition avec les premières qu'on désigne sous le nom de machines à simple effet, parce que dans ces dernières la machine ne développe de force que dans la descente du piston, au lieu que dans la première la force motrice est continue. On estime que la quantité de combustible nécessaire pour produire le même effet dynamique est, dans les machines à simple et à double effet, comme 4 est à 1. Wolff a

ensuite introduit dans la machine Wat une amélioration importante, qui consiste à employer la vapeur à une force élastique de plusieurs atmosphères, et à la faire agir successivement dans deux cylindres; l'effet qu'elle produit dans le premier est dû à sa dilatation, et dans le second à sa condensation. Il paraît que les machines de Woolf ont sur celles de Wat un grand avantage pour l'économie du combustible. M. Perkins paraît avoir obtenu des résultats encore plus avantageux en employant la vapeur à une température extrêmement élevée.

427. La fig. 263 représente une machine de Wat: A est la chaudière, B le tuyau qui conduit la vapeur, C le cylindre, D le piston, E le condenseur, *a* et *a'* deux soupapes qui introduisent successivement la vapeur en dessus et en dessous du piston; *b* et *b'* deux autres soupapes faisant alternativement communiquer avec le condenseur E, l'espace du cylindre dans lequel la vapeur a produit son effet. F est une pompe qui aspire l'air et l'eau chaude du condenseur; G une pompe qui fait monter l'eau chaude dans le réservoir H, d'où elle se rend dans la chaudière par le tuyau *mn*; I une troisième pompe qui fournit de l'eau au condenseur; les pompes F, G et H sont mises en mouvement par le grand balancier MN; K est une roue d'une très-grande masse, mise aussi en mouvement par le grand balancier, et qui sert à régler le mouvement; car lorsque la vitesse de la machine tend à diminuer, le volant lui en restitue, et lorsque cette vitesse tend à augmenter, elle en absorbe une grande partie. Les tringles *p* et *q* qui sont mises en mouvement par les arrêts *x*, *y*, de la tige de la pompe F, servent à ouvrir et fermer les soupapes *a*,*a'*, *b*,*b'*; les tringles *z*, *t*, *u*, *v*, sont destinées à maintenir la tige du piston D dans une position verticale pendant le mouvement; L est un réservoir d'eau chaude qui sert à alimenter la chaudière au moyen du tube P; pour que l'eau soit toujours dans la chaudière à la même hauteur, l'extrémité supérieure du tube P est fermée par un bouchon suspendu au lévier QR, mobile autour du point S; à l'extrémité R se trouve un fil métallique qui descend dans la chaudière et qui suspend un flotteur T; lorsque le niveau de l'eau s'abaisse, le poids du flotteur soulève le bouchon du tuyau P, et l'eau entre dans la chaudière; lorsque

le niveau s'est élevé à sa limite, le flotteur ne tend plus le fil, et le bouchon ferme le tuyau. Ces détails sont très-incomplets ; mais ils suffisent pour donner une idée générale de la disposition de l'appareil.

M. Perkins vient d'employer la vapeur à une haute température, en remplacement de la poudre dans les machines à lancer les projectiles ; il paraît qu'il a obtenu des résultats satisfaisans.

428. Nous avons déjà reconnu (page 301) que la force élastique de la vapeur qui se développe sur un liquide croît beaucoup plus rapidement que la température ; le même effet a lieu pour les vapeurs des liquides qui ne se maintiennent à cet état que par une très-grande pression. Dans ces dernières vapeurs, un très-faible changement de température produit une très-grande différence de force élastique ; par exemple, l'acide carbonique liquide à — 11° centigrades exerce une pression de 20 atmosphères, et à 0° elle est de 36. Il résulte de là que les liquides dont il est question pourraient, par de faibles changemens de température, développer des forces que l'on n'obtient avec la vapeur d'eau qu'avec de grandes dépenses de combustibles. Ces considérations, qui appartiennent à M. Davy, pourront, par la suite, fournir d'utiles applications.

§ III.

De la mesure des Températures.

429. La température d'un corps à un instant déterminé est la quantité de chaleur qui s'en dégage à cet instant. Pour estimer cette chaleur, on se sert ordinairement de la dilatation qu'elle produit dans un corps qui la reçoit et que nous avons désigné sous le nom de thermomètre ; dans quelques circonstances particulières on emploie d'autres moyens que nous examinerons ensuite.

430. Supposons que nous ayons une tige cylindrique homogène d'un corps qui, par des additions successives de quantités égales de chaleur, se dilate successivement de quantités égales, et dont la température croisse en même temps d'une manière uniforme ; les températures seraient alors proportionnelles aux alongemens de cette tige. Mais on n'obtiendrait



pas encore exactement la mesure des températures, car lorsque l'instrument serait plongé dans un milieu quelconque, la température d'équilibre dépendrait de trois élémens, des températures initiales des deux corps, du rapport de leur masse et de celui de leur capacité calorifique. Par conséquent, la température indiquée par l'instrument ne sera jamais égale à celle du milieu dans lequel il a été plongé, et cette différence variera avec les circonstances dont nous venons de parler, suivant des lois que nous avons fait connaître; mais on sera toujours maître de la rendre aussi petite que l'on voudra; car en donnant au corps mis en contact avec l'instrument une masse très-grande relativement à celle de l'instrument lui-même. Il est évident que la température d'équilibre différera peu de la température initiale.

Mais indépendamment des difficultés que présenterait la mesure de la dilatation de la tige à différentes températures, il faut encore observer qu'il est complètement impossible, dans l'état actuel de la science, de reconnaître si un corps se dilate uniformément et si sa capacité calorifique est constante, car nous ne pouvons pas mesurer directement des quantités égales de chaleur; il est donc rigoureusement vrai de dire que nous n'avons aucun moyen certain pour estimer les températures.

Cependant comme on a reconnu que les gaz, les vapeurs non saturées et le mercure se dilataient de la même quantité dans les mêmes circonstances, il en résulte que la loi de dilatation de ces corps est parfaitement la même; et on a regardé comme probable que cette égalité de dilatation, dans les mêmes circonstances, provenait de ce que, dans chacun d'eux, la dilatation était uniforme et la capacité calorifique constante. D'après cette hypothèse, on peut mesurer les températures par la dilatatinn des gaz, du mercure et de tous les corps solides dont la dilatation paraît suivre la même loi.

431. *Thermomètre à Mercure.* Supposons un tube capillaire en verre terminé par une boule de même matière, pleine de mercure qui s'élève jusqu'à une certaine hauteur dans le tube; la colonne de mercure montera par une élévation de température et descendra par un abaissement, et ces variations seront d'autant plus grandes dans les mêmes circonstances, que le diamètre intérieur du tube sera plus petit relativement au volume de la boule; les dilatations apparentes sont le résultat de la dilatation

du mercure, diminuée de celle du verre ; et comme ce dernier paraît se dilater uniformément, la dilatation apparente sera aussi uniforme. Mais pour que ces instrumens soient comparables, il faut nécessairement que les graduations partent d'une température fixe, et que les degrés soient des mêmes fractions du volume du métal à ce point de départ ; ou bien, s'il existe deux températures fixes que l'on puisse facilement produire, en marquant sur le tube l'extrémité de la colonne de mercure correspondante à chacune d'elles, et divisant l'intervalle en un même nombre de parties d'égale capacité, il est évident que tous les instrumens construits de cette manière donneront, dans les mêmes circonstances, exactement la même indication ; c'est toujours ce dernier moyen que l'on emploie, et les deux températures fixes que l'on a choisies sont celles de la glace fondante et de l'ébullition de l'eau ; la première reste absolument la même dans toutes les circonstances, la seconde ne varie qu'avec la pression de l'air, la nature et la quantité des substances étrangères renfermées dans l'eau, de sorte qu'en opérant sur de l'eau distillée et à la pression de $0^m,76$, elle est aussi parfaitement constante. Nous pouvons maintenant exposer les détails de la construction d'un thermomètre.

On commence par se procurer un tube capillaire, dont le diamètre soit partout sensiblement égal ; on reconnait l'égalité du calibre du tube lorsqu'en y introduisant une bulle de mercure (1), elle conserve la

---

(1) Si le tube n'était pas cylindrique, les parties d'égale longueur auraient des capacités différentes ; on pourrait le diviser d'abord en parties d'égale capacité par un procédé très-simple dû à M. Gay-Lussac : il consiste à introduire dans le tube une quantité de mercure suffisante pour en occuper plus de la moitié (*fig.* 267), et on marque l'extrémité C de cette colonne ; ensuite on la fait passer de l'autre côté du tube, et on marque l'extrémité D de la colonne ; comme la distance C D est très-petite, on pourra la considérer comme cylindrique, et son milieu O divisera le tube en deux parties d'égal volume ; on pourra diviser de la même manière A O en deux parties égales, et ainsi de suite : mais il sera plus commode d'introduire d'abord dans le tube une très-petite bulle de mercure *ab* ; on marquera sur le tube son extrémité *b*, ensuite on la fera glisser un peu plus loin ; si l'on pouvait faire coïncider son extrémité *a'* avec *b*, le point *b'* serait une seconde division égale à la première ; mais cette coïncidence étant difficile à établir, on se contente d'approcher le point *a'* aussi près que possible du point *b*, et comme le tube peut être considéré comme cylindrique dans la longueur *bb'*, on prend la distance *a'b'*, que l'on porte sur le tube en partant du point *b*, et on a une seconde division égale à la première ; on trouve de la même manière les suivantes. Si l'on voulait employer la méthode de la division successive en deux parties égales, on pourrait appliquer le même principe pour se passer des coïncidences de la colonne de mercure avec les divisions déjà tracées.

même longueur en la promenant dans toute son étendue ; ensuite, à l'aide d'une lampe à émailleur, on souffle une boule à son extrémité, ou bien on y soude un tube fermé d'un plus grand diamètre. Il faut alors remplir la boule et le tube de mercure distillé ; pour cela on soude à l'extrémité supérieure du tube un petit entonnoir A (*fig.* 264), dans lequel on met une certaine quantité de mercure ; le tube étant très-capillaire, l'air qu'il renferme s'oppose à cette introduction ; mais si on fait chauffer la boule, une partie de l'air se dégage à travers le mercure ; et lorsque le tube est refroidi, une partie du métal est descendue dans la boule et occupe la place de l'air qui s'est dégagé ; lorsque la boule est en partie pleine, il faut soumettre de nouveau la boule et le tube à l'action d'une forte chaleur, jusqu'à ce que tout l'air et la vapeur d'eau qui étaient renfermés dans l'appareil et dans le mercure et qui adhéraient aux parois du verre aient été chassés par la vapeur mercurielle ; une ébullition de quelques minutes est presque toujours suffisante, et après le refroidissement, la boule et une partie du tube se trouvent remplis de mercure sans interposition d'aucunes bulles d'eau ni de vapeur. On s'assure alors si la quantité que l'on en a introduite n'est pas trop grande ou trop petite pour les limites de température que l'instrument doit indiquer ; il est évident qu'il faut que pour les plus hautes, le mercure ne sorte pas du tube, et que pour les plus basses, il ne rentre pas en totalité dans la boule. Après on doit fermer le tube à la lampe, mais il faut avant en chasser tout l'air, car s'il en restait, par l'agitation il pourrait s'introduire entre le mercure et séparer la colonne métallique (1) ; on y parvient facilement en effilant le tube, chauffant jusqu'à ce que le mercure en occupe toute la longueur, et le fermant brusquement à la flamme d'un chalumeau. L'instrument ainsi disposé, il faut marquer sur le tube les points qui correspondent aux températures de la glace fondante et de l'eau bouillante. La détermination de la première limite n'exige qu'une seule précaution, celle de plonger tout l'instrument dans la glace ou la neige en fusion (2). Mais

(1) Si cet accident arrivait, il faudrait suspendre l'instrument à l'extrémité d'une fronde que l'on ferait tourner rapidement ; la force centrifuge produite par ce mouvement réunirait promptement les colonnes de mercure séparées.

(2) La température de la glace fondante est fixée ; il n'en est pas de même de celle de la congélation de l'eau (406).

celle de l'eau bouillante exige plusieurs précautions indispensables, qui sont, 1° d'employer de l'eau distillée, 2° de la mettre en ébullition dans un vase de métal, 3° de soumettre tout l'appareil à la température qu'il doit indiquer, 4° et enfin d'opérer sous une pression de $0^m,76$. On emploie de l'eau distillée, parce que si l'eau renfermait des sels étrangers, ils retarderaient l'ébullition. Le vase doit être de métal, car, d'après les expériences de M. Gay-Lussac, dans des vases de verre l'ébullition n'a lieu qu'à une température plus élevée (1). La nécessité de soumettre la totalité de l'instrument à l'action de la chaleur de l'eau bouillante est évidente : on pourrait remplir cette condition en le plongeant entièrement dans l'eau bouillante, mais la grande masse d'eau qu'il faudrait employer pourrait occasionner de graves erreurs, parce que les couches inférieures ayant à soulever non-seulement le poids de l'atmosphère, mais encore celui des couches supérieures, leur température serait nécessairement plus élevée ; pour éviter cet inconvénient, on emploie l'appareil (*fig.* 268), composé d'une boîte en fer-blanc ou en cuivre, surmontée d'un cylindre à la partie supérieure duquel se trouvent deux tubulures *a* et *b* ; on met une couche d'eau de quelques centimètres dans la boîte, on suspend le thermomètre par un bouchon à travers lequel il passe et qui ferme le cylindre BC, de manière que la boule seule de l'instrument soit plongée dans l'eau ; on chauffe la boîte, et le liquide étant arrivé à l'ébullition, quelques instans après toute la capacité de l'appareil se trouve à une température uniforme, parce que la vapeur est à la même température que le liquide qui la fournit, et qu'aussitôt que l'appareil est échauffé, celle qui se forme sort presque en totalité par les tubulures *a* et *b*. Enfin, la dernière condition, celle d'une pression de $0^m,76$, est évidemment d'une nécessité aussi absolue que les autres, puisque la température de l'ébullition dépend de la pression ; mais comme on n'est pas toujours maître d'opérer sous cette pression, il est indispensa-

(1) On peut facilement reconnaître que l'ébullition de l'eau a lieu dans des vases de verre à une température plus élevée que dans des vases métalliques ; car si après avoir fait bouillir de l'eau dans un vase de verre on l'enlève du feu, l'ébullition cesse et on la rétablit en y jettant de la limaille de fer ou tout autre métal.



ble de connaître l'erreur que l'on peut commettre en opérant sous toute autre. M. Wolaston, frère du célèbre chimiste, a trouvé, à la suite d'un grand nombre d'expériences, qu'une diminution de pression de $0^m,027$, abaissait d'un degré le terme de l'ébullition ; ce physicien a même proposé d'employer la température de l'ébullition pour déterminer les pressions atmosphériques sur les montagnes ; mais ce procédé n'est pas susceptible de la même exactitude que le baromètre.

432. Il ne reste plus après qu'à diviser la longueur du tube compris entre les deux limites a et b, (*fig.* 265, 266), en un certain nombre de parties d'égale capacité qu'on nomme degrés. Lorsque le tube est bien cylindrique, ces parties sont égales en longueur (1). Le nombre des divisions comprises entre la glace fondante et la température de l'eau bouillante, est de 100° dans le thermomètre centigrade, de 80 dans le thermomètre de Réaumur, et de 180 dans celui de Farenheit, dont on se sert en Angleterre. Dans les deux premiers, la division correspondante à la glace fondante est marquée 0°; dans celui de Farenheit, elle est marquée 32°, parce que dans ce dernier instrument le zéro a été pris au moyen d'un mélange frigorifique. Dans tous, l'échelle est étendue au delà de la température de l'ébullition par des divisions égales, et dans les deux premiers, au-dessous de zéro, de la même manière (2). Lorsqu'on donne l'indication d'un thermomètre, il est indispensable d'ajouter s'il est centigrade, Réaumur ou Farenheit. Il est d'ailleurs très-facile de trouver les indications correspondantes de ces trois instrumens ; en effet, pour transformer des degrés centigrades en degrés Réaumur, il est évident

(1) Si le tube n'était pas parfaitement cylindrique, et s'il n'avait pas été d'abord divisé en parties d'égale capacité, ce qu'il y aurait de mieux à faire serait de marquer sur le tube plusieurs degrés intermédiaires, par la comparaison avec un autre thermomètre dont la division serait bien exacte : pour cela on plongerait les deux instrumens dans un même liquide à différentes températures ; on pourra toujours rapprocher assez ces points pour que, dans l'espace qui les sépare, le tube puisse être regardé comme cylindrique, et par conséquent divisé en parties égales.

(2) Il paraît que, dans les thermomètres à mercure scellés, le zéro se déplace progressivement par le temps, s'élève et finit par atteindre une limite qu'il ne dépasse plus. Des thermomètres construits avec beaucoup de soin ont marqué jusqu'à 2° à la température de la fusion de la glace. Ce phénomène, dont on ignore la cause, ne se manifeste ni dans les thermomètres à mercure non fermés, ni dans les thermomètres à alcool.

qu'il faut multiplier les premiers par $\frac{100}{80}$ ou par $\frac{5}{4}$, et pour les traduire en degrés Farenheit, il faut les multiplier par $\frac{180}{100}$ ou $\frac{9}{5}$ et ajouter 32. Les thermomètres à mercure ne sont exacts que pour des températures très-éloignées de celles de l'ébullition et de la congélation de ce métal. Ainsi, au-delà de 250° et au-dessous de 20°, il ne faudrait pas compter sur leurs indications.

433. *Thermomètre à Alcool.* On emploie quelquefois l'alcool coloré par l'orseille à la place du mercure ; mais comme les dilatations de l'alcool ne sont pas régulières, ces instrumens ne méritent pas, à beaucoup près, autant de confiance que ceux à mercure ; on les emploie cependant pour mesurer les températures très-basses, pour lesquelles ces derniers ne pourraient pas servir. On les gradue et on les divise absolument de la même manière. Quoique l'alcool bouille sous la pression ordinaire à 78°, dans un thermomètre fermé il peut facilement être soumis à 100° sans changer d'état, parce que sa vapeur forme dans le tube une atmosphère qui retarde són ébullition de beaucoup au delà de cette température. Cet instrument ne peut pas servir pour des températures très-basses ; car M. de Bussy a observé que l'alcool se congelait à 33° au-dessous de zéro.

434. *Thermomètres à Air.* Les thermomètres à air sont composés d'un tube capillaire très-long ouvert par une de ses extrémités et terminé par une boule. On remplit la boule et le tube d'air sec par le procédé indiqué (382), on introduit une bulle de mercure dans le tube pour séparer l'air extérieur de l'air intérieur, et on gradue comme à l'ordinaire. Pour que les indications soient comparables entre elles, l'instrument doit rester dans les mêmes positions, afin que le poids de l'index de mercure agisse toujours de la même manière sur l'air intérieur; car la pression qu'il exerce est égale à son poids, décomposé suivant la direction de l'axe du tube. Pour les graduer, il faut nécessairement que la capacité de la boule ne soit pas plus grande que le triple de celle du tube (182); autrement l'index de mercure sortirait du tube à 100° ou rentrerait dans la boule à 0°. Ces instrumens ont le grand défaut d'être influencés par la pression de l'air, et, par conséquent, de varier avec elle. On ne les emploie guère que dans quelques recherches de physique, à cause de leur grande sensibilité, et pour mesurer de très-basses températures.

435. *Thermomètres métalliques.* Lorsque deux lames métalliques rectilignes d'inégale dilatation sont réunies entre elles d'une manière invariable par deux faces, un chan-

gement de température courbe leur ensemble, de manière que la lame qui se dilate le moins est dans la concavité de la courbe, si la température s'élève, et dans la convexité, si elle baisse. Nous avons indiqué, p. 286, la construction d'un pendule compensateur fondé sur ce principe. M. Breguet en a fait une heureuse application à la construction d'un thermomètre d'une grande sensibilité. Cet appareil (*fig.* 268) est composé d'une hélice cylindrique MN fixée par une de ses extrémités à une pièce de cuivre PQ, et dont l'autre extrémité suspend une aiguille *ab*; l'hélice est formée de trois lames de platine, d'or et d'argent, qui ont été réunies par une forte pression. L'inégalité des dilatations du platine et de l'argent fait tordre ou détordre la spirale par les changemens de température, et, par conséquent, fait tourner l'aiguille *ab*. On a reconnu, par des expériences directes, que les arcs décrits par l'aiguille étaient proportionnels aux températures. Par conséquent, en déterminant, par la comparaison avec un bon thermomètre, les positions de l'aiguille correspondantes à deux températures quelconques, divisant l'intervalle en un nombre de parties égales entre elles et à la différence des températures, et portant ces divisions au delà de ces deux termes, on aura un instrument dont les indications seront aussi certaines que celles des thermomètres à mercure. Nous avons dit que l'hélice était formée de trois métaux; on pourrait ne mettre que les deux extrêmes, l'argent et le platine; mais l'or, placé entre eux, ayant une dilatation moyenne, empêche les deux premiers de se déchirer par la grande inégalité de leur dilatation. Cet instrument est, sous le rapport du temps, d'une sensibilité infiniment plus grande que les autres thermomètres; et en augmentant le rayon du cercle A B ainsi que la longueur de l'aiguille, on pourrait soudiviser un degré en un nombre très-grand de parties.

436. Borda, dans les grandes opérations géodésiques de la mesure d'un arc du méridien de France, se servait d'un thermomètre métallique d'une construction très-simple; il employait pour mesure linéaire une grande règle de platine de douze pieds de long, dont il fallait connaître exactement la température à chaque opération: pour cela, Borda avait appliqué sur cette règle (*fig.* 269) une autre en cuivre moins longue, fixée invariablement avec la première par une de ses extrémités; l'autre extrémité de la règle de cuivre correspondait à des points de la lame de platine qui différaient suivant la température. Pour déterminer, d'après la position de l'extrémité de la barre de cuivre, la température commune des deux barres, Borda plongea l'appareil dans l'eau bouillante, et marqua sur la règle de platine l'extrémité de celle de cuivre, répéta la même opération en immergeant l'appareil dans la glace fondante; l'intervalle des deux divisions fut partagée en parties égales. Il est évident, d'après cela, que la ligne de coïncidence indiquait sur l'échelle la température; comme les divisions étaient très-petites, on les observait au moyen d'une loupe que portait la tige de cuivre.

437. Tous les instrumens dont nous venons de parler ne peuvent être employés que pour déterminer des températures peu élevées. Ceux qui sont en usage pour estimer les hautes températures portent le nom de Pyromètres ; un seul est employé assez fréquemment dans les arts, il est connu sous le nom de Wedgwood son inventeur ; il est fondé sur le retrait qu'éprouve l'argile lorsqu'elle est soumise à l'action de la chaleur ; ce retrait croît avec la température, mais suivant une loi inconnue ; il est dû, jusqu'à une certaine limite, à l'eau que l'argile abandonne, mais au delà, il paraît provenir uniquement d'une plus forte agglomérature des parties. Il est composé (*fig.* 270) d'une plaque de cuivre ABCD sur laquelle sont fixées trois barres de même métal inclinées entre elles, de manière que l'intervalle des barres N et P est égal à celui qui formerait le prolongement des barres M et N ; l'une des règles est divisée en 240 parties égales qu'on nomme degrés ; un petit cône tronqué *abcd*, fait en argile et cuit à la chaleur rouge naissant, placé entre les règles fixes, s'enfonce jusqu'à une ligne marquée zéro. Lorsqu'on veut connaître la température d'un fourneau, on y introduit un des petits cônes d'argile dans un creuset fermé ; on le retire après qu'il en a pris la température, on le laisse refroidir et on le place entre les règles, en le faisant glisser jusqu'au point le plus élevé qu'il puisse atteindre : le degré de l'échelle auquel il parvient indique la température. Pour que les indications d'un même instrument soient comparables, il faut que les cônes d'épreuve soient construits avec la même substance ; et, même dans ce cas, l'instrument ne peut pas indiquer des rapports, car on ne sait pas si le retrait est proportionnel à la température. On a trouvé que le zéro de ce pyromètre correspondait à 580°,55 du thermomètre centigrade, et que chaque degré du pyromètre représentait 72°,22 du même thermomètre ; mais, d'après ce qui précède, on ne peut pas compter sur cette valeur du degré de cet instrument.

438. *Thermomètre à maximâ et minimâ.* Il est souvent important de connaître la température d'un lieu auquel on ne peut pas parvenir pour y faire des observations directes, tels que le fond de la mer et des lacs, ou les températures maximum ou minimum qui ont lieu dans des temps où l'on ne peut pas être à observer le thermomètre. Pour cela, il faut avoir des instrumens qui laissent une trace du maximum et du minimum de hauteur de la colonne liquide. L'instrument que nous allons décrire est composé (*fig.* 271) d'une planche sur laquelle se trouvent fixés deux thermomètres à tiges horizontales placés en sens contraire. Le thermomètre A est à alcool blanc ; il est destiné à indiquer le minimum de température ; il renferme pour cela un petit cylindre d'émail *a* d'un diamètre un peu plus petit que celui du tube ; cet index, amené, par l'inclinaison de l'instrument, en dedans du liquide jusqu'à ce qu'il touche l'extrémité de la colonne liquide, reste dans sa position si le liquide se dilate, et s'il éprouve un retrait, il l'entraîne avec lui, de

sorte que l'extrémité de ce cylindre la plus éloignée de la boule indique le minimum de température auquel l'instrument est parvenu. Le thermomètre inférieur B est à mercure, il renferme un petit cylindre d'acier *b* d'un diamètre un peu plus petit que celui du tube ; comme l'acier n'est point mouillé par le mercure, la colonne, en se dilatant, le pousse devant elle, et l'abandonne lorsqu'elle est parvenue à son plus grand alongement ; l'extrémité de cet index la plus voisine de la boule indique donc le maximum de température auquel l'instrument s'est élevé. Il est évident que les deux thermomètres étant disposés comme dans la figure, en inclinant de gauche à droite la planche qui les supporte, les deux index viennent se remettre à leur place.

439. M. Gay-Lussac a imaginé un instrument qui remplit le même objet, mais qui est fondé sur un autre principe. Il consiste (*fig.* 272) en une boule de verre A terminée par un tube B d'un petit diamètre, percé à son sommet d'une ouverture très-capillaire ; ce tube est environné d'un cylindre CD, d'un plus grand diamètre, mastiqué autour du tube B dans l'étendue FC. La boule A étant remplie d'eau, et le cylindre CD de mercure jusqu'en E, si on soumet l'appareil à une température plus basse, il se fera un vide dans la boule ; une partie du mercure, proportionnelle à l'abaissement de température, y pénétrera et n'en pourra plus sortir. On conçoit qu'en déterminant, par des expériences préliminaires, la quantité de mercure qui passe dans la boule par un abaissement d'un degré du thermomètre centigrade, et connaissant la température initiale, on pourra trouver le minimum de température auquel l'instrument a été soumis, en introduisant le mercure dans un tube gradué MN, dont chaque division aurait un volume égal à celui du mercure qui tombe dans la boule par un abaissement d'un degré. Si l'instrument que nous venons de décrire était soumis à une température plus élevée, une partie du liquide sortirait de la boule, passerait au-dessus du mercure, et la température revenue à son état primitif, on trouverait dans la boule une quantité de mercure égale à celle qui s'y serait introduite par un abaissement de température d'un même nombre de degrés. Ainsi, la quantité de mercure passé dans la boule donne la mesure des variations de températures au-dessous ou au-dessus de la température primitive ; mais rien n'indique si la température a baissé ou augmenté. Pour reconnaître dans quel sens la variation s'est faite, il suffit de placer au-dessus du tube B une petite cloche de verre pleine de mercure qui entoure ce tube et que l'on maintient fixe ; si la température a été élevée, on trouvera dans la cloche du liquide de la boule, et on n'en trouvera point dans le cas contraire.

440. On peut encore estimer les températures des corps par un autre procédé qu'il est bon de connaître. Lorsqu'on mêle deux corps qui n'exercent aucune action chimique l'un sur l'autre, la température du mélange dépend des poids relatifs des

corps, de leur température initiale et de leur capacité calorifique. En désignant la première masse par m, sa température par t, sa capacité calorifique par x, par m', t', y, les quantités correspondantes pour le second corps, et par T la température du mélange, nous avons vu, pag. 313, que ces quantités étaient liées entre elles par l'équation $mx(t-T) = m'y(T-t')$; d'où l'on peut facilement tirer la valeur de t ou de t', lorsque les autres quantités sont connues.

§ IV.

Sources de la Chaleur.

441. Pour terminer l'histoire de la chaleur, il ne nous reste plus qu'à parler de ses différentes sources; elles sont assez nombreuses. Nous les examinerons successivement.

442. *Le Soleil.* Ce corps est maintenant la source de chaleur la plus influente sur la terre. Il en échauffe inégalement les différentes parties suivant la durée de son rayonnement sur elles et l'obliquité de ses rayons. En général la température décroît de l'équateur vers les pôles; l'hémisphère boréal, à parité de latitude, a une température moyenne supérieure à celle de l'hémisphère austral. Les mers s'échauffent ainsi que les continens, mais à cause des courans polaires qui tendent à répartir uniformément leur température, il paraît, d'après M. de Humbolt, que nulle part elle n'excède 30°. Dans un même lieu, la température de la terre est le minimum au lever du soleil et le maximum à deux heures après midi pour les jours les plus courts, et à trois heures pour les jours les plus longs; la température moyenne du jour est très-voisine de la demi-somme des températures maximum et minimum et de celle du coucher du soleil; le maximum de la chaleur solaire est toujours à midi; la raison de cette différence est évidente, car la chaleur de la terre à un instant déterminé dépend non-seulement de l'intensité du rayonnement solaire à cet instant, mais encore de la durée antérieure de ce rayonnement; c'est par la même raison que l'été est plus chaud que le printemps, quoique dans ces deux saisons la position du soleil soit la même. Dans la mer, le maximum paraît

avoir lieu seulement à trois heures. La température de l'air s'abaisse très-rapidement à mesure qu'on s'élève au-dessus de la surface de la terre, parce que l'air s'échauffe faiblement par les rayons directs du soleil et que l'influence du rayonnement de la terre diminue à mesure qu'on s'en éloigne. L'intensité de l'action calorifique des rayons solaires est très-grande; on l'augmente beaucoup en diminuant la perte ocasionnée par le rayonnement du corps échauffé; d'après M. de Saussure, un thermomètre qui avait été placé au fond d'une caisse noircie et fermée par des lames de verre parallèles exposées au soleil, s'est élevé à 140°; les thermomètres placés dans les intervalles des lames de verre indiquaient des températures décroissantes à mesure qu'ils s'éloignaient davantage du fond de la caisse. La cause de ce phénomène consiste en ce que le verre laisse facilement passer la chaleur qui accompague les rayons solaires, mais arrête la chaleur obscure, dans laquelle la chaleur solaire paraît se transformer dans l'appareil.

443. *Chaleur centrale.* Nous avons donné (371) quelques détails sur la chaleur centrale de la terre; ici nous ajouterons seulement que l'accroissement de chaleur, à mesure qu'on s'enfonce dans l'intérieur de la terre, paraît être de 1° pour 30 à 40 mètres.

444. *Pression et Percussion.* Lorsqu'un corps diminue de volume par la pression, la chaleur doit nécessairement s'en dégager, comme l'eau jaillit d'une éponge comprimée. Les corps solides et liquides n'étant pas susceptibles d'éprouver une diminution notable de volume par une simple pression, ne dégagent pas sensiblement de chaleur. Les corps gazeux, au contraire, étant très-compressibles, en développent une grande quantité. Mais c'est principalement par une percussion vive que les corps émettent de la chaleur; tout le monde sait que les métaux frappés sur une enclume s'échauffent souvent au delà de la température que peut supporter la main; l'eau, l'air, l'oxigène et le chlore, fortement comprimés, dégagent de la chaleur et de la lumière; c'est même sur cette propriété que sont fondés les briquets pneumatiques. Ces instrumens sont composés (*fig.* 273) d'un cylindre creux A B en métal ou en verre, dans lequel se meut un piston dont l'extrémité inférieure *a* renferme, dans une petite cavité, un fragment d'amadou; en abaissant vivement le piston et le retirant aussitôt, l'amadou se trouve incandescent.

445. M. Gay-Lussac a reconnu, par des expériences directes, qu'un espace vide que l'un remplit brusquement ne dégage point de chaleur ; par conséquent, le vide est librement traversé par la chaleur qui ne se condense pas par la diminution d'étendue de cet espace.

446. *Frottement.* Lorsque des corps de même nature ou de nature différente sont vivement frottés l'un contre l'autre, il se développe une quantité de chaleur d'autant plus grande que le frottement est plus rapide. C'est ainsi qu'il se manifeste beaucoup de chaleur sur l'essieu des roues, dans les métaux que l'on lime ou que l'on perfore, dans le choc de l'acier contre le silex, etc. ; et c'est d'après ce principe que plusieurs peuplades de sauvages se procurent du feu en frottant vivement deux morceaux de bois sec. M. Humphry Davy, en frottant deux morceaux de glace l'un contre l'autre, est parvenu à en fondre une partie. Le dégagement de la chaleur par le frottement est très-facile à expliquer dans le système où l'on regarde la chaleur comme provenant des vibrations de l'éther ; elle est, au contraire, très-difficile à expliquer dans l'autre.

447. *Changement d'état des Corps.* Nous avons vu que toutes les fois qu'un gaz passe à l'état liquide (423) ou un liquide à l'état solide (405) sans source de froid, il y avait émission de chaleur ; la première transformation peut avoir lieu par pression, la seconde ne se manifeste que par des actions chimiques.

448. *Actions Chimiques.* Dans un grand nombre d'actions chimiques il y a dégagement de chaleur ; dans plusieurs, le changement d'état des corps paraît en être la cause la plus influente ; quelquefois même il doit être attribué à la différence de capacité calorifique de la combinaison et de ses élémens ; mais dans toutes il existe une cause d'émission qui réside dans le fait seul de la combinaison et qui n'est point connue. Cette cause, quelquefois faible, laisse dominer les premières que nous avons énoncées ; mais souvent, très-puissante, elle produit une émission de chaleur, lorsque la considération seule du changement d'état ou de capacité calorifique indiquerait une absorption. Nous ne pouvons point entrer ici dans l'examen des phénomènes chimiques qui produisent de la chaleur, nous nous bornerons à quelques détails sur une des classes les plus importantes de ces combinaisons, sur la combustion.

449. L'air est composé d'un mélange de deux gaz, l'azote et l'oxigène ; le dernier, qui en forme les 0,21, a une tendance plus ou moins grande à se combiner avec tous les corps qui n'en sont pas saturés, et cette combinaison porte le nom de combustion ; la combustion, comme celle du fer exposé à l'air, a quelquefois lieu sans dégagement de chaleur ; quelquefois, comme celle du phosphore à la température ordinaire, avec émission de lumière sans chaleur, mais le plus souvent la combustion est accompagnée d'un développement considérable de chaleur et de lumière ; telle est celle du bois, de la houille dans nos foyers, de l'hydrogène dans les appareils destinés à l'éclairage. C'est à l'illustre Lavoisier que nous devons la connaissance de la nature de la combinaison qui s'effectue dans la combustion ; M. Berzelius a proposé une hypothèse fondée sur l'électricité pour expliquer l'origine de la grande quantité de chaleur qui se développe dans les combinaisons chimiques. Nous l'examinerons plus tard.

450. M. Pouillet, à la suite d'un grand nombre d'expériences, a découvert que toutes les fois qu'une substance liquide était versée sur un corps solide quelconque réduit en poudre ou en petits fragmens, la température du mélange s'élevait d'une quantité sensible. Les substances inorganiques, mouillées avec de l'alcool, de l'acide nitrique, de l'huile, s'échauffent en général de 0°,25 ; mais les substances organiques dégagent de 1° à 10° de chaleur.

451. Chez tous les animaux pourvus de poumons ou d'appareils remplissant les mêmes fonctions, il se forme dans ces organes une combustion continuelle aux dépens d'une partie du carbone et probablement de l'hydrogène du sang ; l'air exhalé renferme tout l'azote aspiré, une partie de l'oxigène qui a échappé à la combustion, de l'acide carbonique et une nouvelle quantité d'azote émise par l'individu, plus grande chez les frugivores que chez les carnivores. La chaleur dégagée par cette combustion représente les 0,7 ou les 0,9 de la chaleur totale émise par l'animal ; le surplus de la chaleur animale doit être attribué au mouvement, au frottement et à l'assimilation. Ces importantes observations sont dues à M. Despretz.

§ V.

Du Froid.

452. Nous avons vu (361) que la permanence de température des corps reposait sur un échange de rayonnement, et que toutes les fois qu'un corps se dilatait en conservant ou en changeant son état, il renfermait à la même température une plus grande quantité de calorique latent. Il suit de là qu'un corps peut se refroidir, 1° lorsqu'il rayonne plus de chaleur sur les corps environnans qu'il n'en reçoit ; 2° lorsqu'il se dilate sans changer d'état ou en changeant d'état en totalité ou en partie. Le premier cas est celui du refroidissement ordinaire ; dans l'examen du second, nous considérerons d'abord le cas d'une dilatation sans changement d'état.

453. Les corps solides et liquides ne peuvent être dilatés sans source de chaleur que par des actions chimiques ; mais alors la chaleur produite par la combinaison fait souvent disparaître le froid qui résulterait de la dilatation. Les gaz, au contraire, peuvent se dilater par la diminution de la pression, et produisent alors un froid considérable. Lorsqu'on dilate l'air du récipient d'une machine pneumatique, un thermomètre à mercure descend de plusieurs degrés (une partie de cet abaissement est dû à la dilatation du verre de la boule de l'instrument, par la diminution de pression, comme l'a fait voir M. de Larive ; mais un thermomètre ouvert descend aussi, quoique d'une quantité plus petite). Le thermomètre de M. Breguet, beaucoup plus sensible, descend de 23°. Lorsque l'on a comprimé de l'air dans un réservoir et qu'on le laisse dégager par un très-petit orifice, il produit un froid considérable ; sous une pression de deux ou trois atmosphères, M. Gay-Lussac est parvenu à congeler de l'eau renfermée dans une boule de verre mince ; le froid produit dans cette circonstance est proportionnel à la compression et n'a de limite que cette compression. La rentrée de l'air dans un récipient vide présente un phénomène singulier observé par M. de Larive : il consiste en ce qu'il y a d'abord un abaissement

de température, puis une élévation au-dessus de la température initiale ; le premier effet est le résultat de la dilatation du gaz ; le second paraît résulter de la pression exercée sur le gaz renfermé dans le récipient par celui qui arrive.

454. Quant aux dilatations provenant du changement d'état des corps sans sources de chaleur, la vaporisation des liquides a lieu spontanément : elle est activée par les courans d'air, la diminution de pression, ou l'absorption continuelle des vapeurs qui se forment ; la liquéfaction des corps solides au contraire n'est jamais que le résultat des actions chimiques. Relativement au froid produit par l'évaporation, nous en avons déjà parlé dans différentes circonstances ; nous ajouterons seulement qu'en employant des liquides très-volatils, tels que le carbure de soufre ou l'acide sulfureux, et accélérant l'évaporation en multipliant la surface libre du liquide et l'agitant dans l'air, ou diminuant la pression, ou dirigeant dessus un courant d'air se dégageant d'une masse comprimée, on peut obtenir des températures extrêmement basses. M. de Bussy, par l'évaporation de l'acide sulfureux à l'air libre, a obtenu un froid de — 57°, et dans le vide de — 68° ; les températures ont été déterminées par le thermomètre à air.

Voici la composition et l'effet produit par quelques mélanges frigorifiques :

NATURE ET PROPORTION DES SUBSTANCES.	ABAISSEMENT DE TEMPÉRATURE.
1 partie nitrate d'ammoniaque................ 1 — d'eau..................................	...... de 10° .... à .... — 15°,6
1 — sel marin.............................. 2 — de neige...............................	...... de 0° .... à .... — 20°
3 — de chlorure de calcium cristallisé..... 2 — de neige...............................	...... de 26° .... à .... — 16°
8 — de sulfate de soude cristallisé........ 5 — d'acide hydro-chlorique................	...... de 10° .... à .... — 17°

Dans ces mélanges frigorifiques on n'obtient jamais qu'un abaissement de température limité, 1° parce que la combinaison développe une certaine quantité de chaleur qui diminue d'autant le froid produit, 2° parce que l'affinité des deux substances diminuant avec la température, la cause qui détermine la fusion s'anéantit à une certaine température. Ainsi, par exemple, un mélange de neige et de glace ne peut pas s'abaisser au-dessous de 20°, parce qu'à 22° une dissolution de sel marin abandonnerait son sel pour le laisser cristalliser séparément. Les proportions des substances sont très-importantes pour obtenir le maximum d'effet; cela tient à ce que le froid produit par les combinaisons est le résultat de deux effets opposés, du froid provenant du changement d'état, et de la chaleur dégagée par la combinaison, et que cette différence varie avec les quantités relatives de substances employées. Le mélange de la neige et de l'acide sulfurique en offre un exemple remarquable: une partie d'acide sulfurique mêlée avec quatre parties de neige produit du froid, et parties égales de ces deux substances produisent de la chaleur.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE Ier.

Calorique.

Calorique Sensible.

CALORIQUE RAYONNANT.	Un corps quelconque, quelle que soit sa température, émet continuellement une certaine quantité de chaleur qui se meut en ligne droite avec une très-grands vitesse, et se réfléchit contre les corps polis en faisant un angle d'incidenre égal à celui de réflexion. L'intensité d'un rayon calorifique, émané d'une surfaee quelconque, est proportionnells au sinus de l'angle formé par sa direction avec la surface Il faut distinguer dans les corps le pouvoir émissif, le pouvoir réflecteur et le pouvoir absorbant; les pouvoirs émissif et absorbant croissent ou décroissent ensemble, le pouvoir réflecteur est toujours en sens contraire des deux autres; les corps réfléchissent d'autant plus qu'ils sont mieux polis. Les corps, quelle qne soit leur nature et leur température, s'envoient à chaque instant du calorique rayonnant, et c'est de ees échanges réciproques que résulte ou la permanenee de température quand ils sont égaux, et le rechauffement ou la refroidissement lorsqu'ils sont inégaux.

Propagation de la Chaleur a travers les corps.

Le calorique rayonnant pénètre facilement les gaz, et la chaleur se distribue dans la masse par les mouvemens qui résultent des variations de densité et par le rayonnement de molécule à molécule; mais ce dernier est très-faible; pour qu'une masse de gaz s'échauffe uniformément, il faut que le foyer de chaleur soit à la partie inférieure: il s'établit alors des courans qui distribuent régulièrement la chaleur.

Le calorique rayonnant ne pénètre dans les corps liquides qu'à une très-petite profondeur; la chaleur se propage alors dans leur masse par les mouvemens qui résultent des inégalités de densité et par le rayonnement de molécule à molécule. Cette dernière cause de propagation étant très-faible, pour qu'un liquide s'échauffe uniformément, le foyer de chaleur doit être appliqué à sa partie inférieure; il s'établit alors des courans comme dans les gaz.

La chaleur ne se propage dans les corps solides que par le rayonnement des molécules; l'intensité de ce rayonnement est proportionnel à la différence de température. Les corps conduisent très-inégalement la chaleur; les métaux sont en général bons conducteurs de la chaleur; le verre, la soie, les résines, le soufre, les poteries, les duvets sont au contraire très-mauvais conducteurs.

Refroidissement et Réchauffement.

Lorsqu'une masse fluide, liquide ou gazeuse, se refroidit dans le vide, le refroidissement est uniquement dû au rayonnement; la masse, par la mobilité de ses parties, conserve une température uniforme. Si le refroidissement avait lieu dans l'air ou dans un gaz quelconque, il s'établirait des courans d'air qui accéléreraient le refroidissement.

Le refroidissement des corps solides dans l'air dépend du rayonnement, des courans d'air et de la faculté conductrice du corps pour la chaleur.

Les lois du refroidissement des masses fluides ont été trouvées par MM. Dulong et Petit à la suite d'un grand nombre d'observations; celles du refroidissement des corps en général sont dues à M. Fourier, qui les a déduites de l'analyse.

Explication de différens phénomènes produits par le refroidissement. La rosée est une vapeur humide qui se dépose le matin sur la terre; le serein est une humidité qui se dépose le soir; la gelée blanche est de la rosée congelée. Ces vapeurs proviennent de ce que les corps se refroidissent et que l'air en contact avec un corps froid, abandonne une partie de la vapeur qu'il tenait en dissolution. Le refroidissement est occasionné par le rayonnement vers l'espace planétaire, qui en l'absence du soleil n'est pas compensé; les corps qui rayonnent le mieux et ceux qui ont l'horizon le plus étendu sont ceux qui se couvrent de plus de rosée.

C'est au refroidissement des vitres par l'air extérieur qu'est due la précipitation de vapeurs et quelquefois de glace qu'on y remarque l'hiver.

Calorique latent.

Dilatation des corps.

Tous les corps se dilatent par l'action de la chaleur.

La dilatation des corps solides est sensiblement uniforme de 0° à 100°: au delà elle croît avec la température. La connaissance de la quantité absolue de dilatation des corps solides est d'une grande importance dans les arts, elles ont été déterminées avec une grande précision par MM. Laplace et Lavoisier. La force avec laquelle les corps solides tendent à se dilater est extrêmement grande.

La dilatation des liquides peut s'observer au moyen d'un instrument semblable aux thermomètres. On a reconnu: 1° que la dilatation des liquides pour un même nombre de degrés du thermomètre, croît avec la température: 2° que cet accroissement n'est pas propor-

Dilatation des corps.

tionnel à la température ; 3° que dans les températures voisines de celles de leur changement d'état, les liquides éprouvent de fortes anomalies dans leur dilatation ou leur contraction.

La dilatation des corps gazeux peut s'observer dans un appareil semblable à un thermometre dont la boule et une partie du tube sont occupés par un gas séparé de l'air par une bulle de mercure. M. Gay-Lussac a constaté que tous les gas se dilatent uniformément, et que de 0° à 100° tous augmentent de 0,375 de leur volume à 0°.

C'est la dilatation de l'air qui produit l'ascension de la fumée dans les cheminées ; dans chaque cas particulier, on peut facilement, connaissant la température de l'air chaud et de l'air extérieur, déterminer la vitesse du courant.

La connaissance de la dilatation des corps est indispensable pour corriger les erreurs que l'on commet dans la détermination de leur densité, car on ne peut jamais opérer à la température prescrite.

des Vapeurs.

On appelle vapeur les gaz que produisent tous les liquides, à toutes les températures, dans le vide comme dans les gas.

Dans le vide.

Un liquide introduit dans un espace vide émet instantanément toute la vapeur qu'il peut fournir à cet espace, à cette température ; la force élastique de cette vapeur est indépendante de l'étendue de l'espace vide, pourvu que le liquide soit en excès ; si on augmente l'étendue du vide, de nouvelles vapeurs se forment ; si on le diminue, une portion des vapeurs se condense et la pression reste la même. Si l'espace n'était pas saturé, il se comporterait par les variations de pression comme s'il contenait un gas.

D'après M. Dalton, les forces élastiques de toutes les vapeurs sont égales à des températures également éloignées de celle de leur ébullition.

La densité des vapeurs a été déduite par M. Gay-Lussac de la mesure du volume de vapeur fournie à la température de l'ébullition et sous la pression de 0m,76 par un volume connu de liquide. La vapeur d'eau à 100°, sous la pression de 0m,76, occupe un volume 1700 fois plus grand que celui du liquide qui la fournit.

Dans les gas.

Les vapeurs se développent dans les gas comme dans le vide, seulement les gas retardent l'évaporation, et la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques du gaz et de la vapeur. Ces vapeurs ne supportent point la pression à laquelle est soumis le gaz dans lequel elle est disséminée : la vapeur se loge dans le gas comme dans un espace vide de même volume et à la même température, et n'éprouve de variation de force que par la chaleur, et de condensation que par l'abaissement de température si le gas est saturé, ou par la diminution du volume.

Hygromètres, mesures de l'humidité de l'air. Les hygromètres dont on se sert ordinairement pour estimer grossierement la plus ou moins grande humidité de l'air, sont formés d'une corde de boyau, courte, fixée par une de ses extrémités ; à l'autre se trouve une pièce mobile d'une figure de carton ; la corde se tord par l'humidité et se détord par la sécheresse. Mais le seul instrument que l'on emploie dans les recherches physiques est celui de Saussure ; il est composé d'un cheveu vertical, fixé par son extrémité supérieure, qui se roule sur un petit tambour garni d'une aiguille et dont l'autre extrémité supporte un poids qui le tend ;

DES VAPEURS. — *Dans les gaz.* — les variations d'état hygrométrique de l'air font varier la longueur du cheveu, et par conséquent tourner l'aiguille du tambour, dont l'extrémité parcourt une portion de cadran divisé; on a reconnu que, quelle que soit la température, si l'air est saturé, l'instrument s'arrête au même point, de même que s'il était parfaitement sec. On divise en 100 parties l'espace que décrit l'aiguille en passant de l'extrême sécheresse à l'extrême humidité. M. Gay-Lussac a donné des tables de la tension de la vapeur correspondantes à chaque degré de l'hygromètre à la température de 10°.

CALORIQUE SPÉCIFIQUE.

On appelle calorique spécifique des corps, les quantités relatives de chaleur nécessaires pour élever la température d'un même poids de ces corps d'un même nombre de degrés.

On détermine la chaleur spécifique des corps par plusieurs procédés.

Le premier consiste à faire refroidir un corps dont on connaît le poids et la température, dans un espace environné de glaces de tous côtés. La quantité d'eau qui se forme, divisée par le poids et la température du corps, donne la quantité de glace fondue, par l'unité du poids se refroidissant de 1°.

Le second consiste à mêler deux corps dont on connaît le poids, la température et la capacité calorifique de l'un d'eux : la capacité de l'autre se déduit de la température du mélange.

Le troisième, applicable seulement aux gaz et aux vapeurs, consiste à refroidir un poids ou un volume déterminé de gaz et de vapeur en les faisant passer dans un serpentin plongé dans une caisse pleine d'eau dont on connaît la température et le poids : de la température acquise par ce liquide, on déduit facilement la capacité du gaz qui l'a échauffé.

Le dernier est fondé sur les lois du refroidissement.

Par les mêmes procédés, on détermine la quantité de chaleur qui est rendue latente dans la liquéfaction des corps solides et la vaporisation des gaz.

PHÉNOMÈNES QUI SE DÉVELOPPENT DANS LES CHANGEMENS D'ÉTAT DES CORPS.

Passage de l'état solide à l'état liquide. Lorsque la liquéfaction a lieu par une source de chaleur, il y a permanence de température depuis le commencement jusqu'à la fin de la fusion. Lorsque la fusion a lieu par une action chimique, il y a production de froid.

Retour de l'état liquide à l'état solide. Lorsque ce changement d'état a lieu par une source de froid, il y a encore permanence de température pendant la congélation; mais s'il a lieu par une action chimique, il y a dégagement de chaleur.

L'eau en se congélant se dilate de $^1/_7$ de son volume; récemment bouillie et couverte d'une couche d'huile, elle peut être refroidie, sans se congeler, jusqu'à 12°.

Passage de l'état liquide à l'état de vapeur. Avec une source de chaleur un liquide s'échauffe en vase ouvert jusqu'à la température de l'ébullition, qui reste permanente jusqu'à ce que tout le liquide se soit évaporé. En vase clos l'ébullition n'a point lieu; mais à une certaine température, le liquide se réduit spontanément en vapeurs.

Lorsqu'on fait chauffer des liquides dans des vases clos, on y adapte toujours des soupapes qui laissent dégager la vapeur à la température qu'on ne veut pas dépasser. — *Marmite de Papin*, *marmite autoclave*.

La vaporisation par l'air calme ou agité, dans le vide et par les actions chimiques, produit toujours du froid. — Expérience de M. Leslie.

Évaporation. L'évaporation, dans toutes les circonstances, absorbe la même quantité de chaleur; lorsque l'évaporation a lieu par un foyer de chaleur, c'est lui qui fournit celle que la vapeur rend latente. Dans toutes les évaporations spontanées, elle est fournie par la masse



PHÉNOMÈNES QUI SE DÉVELOPPENT DANS LES CHANGEMENS D'ÉTAT DES CORPS.

liquide, l'air et les corps environnans. L'évaporation par la chaleur, est proportionnelle à la quantité de chaleur reçue par la chaudière. L'influence de l'air n'est sensible que lorsque la température du liquide est peu élevée. Lorsque le foyer n'est pas suffisant pour élever la masse liquide à l'ébullition, la température qu'acquiert le liquide est en raison inverse de la surface libre. Pour une même surface libre de liquide à une température constante, la vaporisation est proportionnelle à la tension du liquide. Quant à l'évaporation spontanée, elle croît avec l'étendue de la surface du liquide, la dessiccation de l'air, la diminution de sa force élastique. Dans les mêmes circonstances d'agitation ou de repos et de force élastique de l'air, la quantité de liquide évaporé est proportionnelle à la différence entre la tension du liquide et celle de l'air.

Les liquides obtenus par la condensation des gaz sous de très-fortes pressions se réduisent en vapeurs par la diminution de pression; et produisent beaucoup de froid.

Retour des vapeurs à l'état liquide. Les vapeurs peuvent retourner à l'état liquide par une source de froid, par la pression ou par une action chimique; dans le premier cas, la vapeur et le liquide formés se refroidissent ensemble; dans les deux autres, il y a production de chaleur.

L'eau qui tombe de l'atmosphère sous toutes les formes est due à la condensation de la vapeur d'eau par un refroidissement subit. — Explication de la suspension des nuages par M. de Saussure et par M. Fresnel.

USAGES DES CHANGEMENS D'ÉTAT DES CORPS COMME FORCE MOTRICE.

On n'a employé jusqu'ici que la force qui se développe dans le passage de l'eau à l'état de vapeur, et qui s'anéantit par la condensation de la vapeur. — Description de la machine de Wat. M. Perkins a employé la vapeur à une très-haute température pour lancer les projectiles.

D'après les observations de M. Davy, la vapeur des liquides provenant des gaz condensés par de fortes pressions présenterait un plus grand avantage; car par une petite variation de température elles éprouvent des changemens de force élastique de plusieurs atmosphères.

Mesure des Températures.

PAR LA DILATATION.

Nous n'avons aucun moyen direct de mesurer des doses de chaleurs croissant suivant une loi quelconque; par conséquent, il est impossible de reconnaître si un corps se dilate uniformément: mais comme les gaz et le mercure, dans certaines limites, se dilatent de la même manière, on a admis que ces corps se dilataient uniformément; et comme les capacités calorifiques de ces corps n'éprouvent que de faibles variations, on les a regardées comme constantes. Ce dernier élément ne pourrait introduire d'erreur dans la mesure des températures qu'autant que la masse de l'instrument ne serait pas très-petite relativement à celle du corps.

Thermomètres à mercure. Les points fixes sont ceux de la glace fondante et de l'ébullition de l'eau: pour déterminer ces deux limites, il faut que la totalité de l'instrument soit soumise à la même température; et de plus, pour la dernière limite, il faut que l'ébullition ait lieu dans un vase métallique et sous la pression de $0^m,76$. Dans le thermomètre centigrade, l'intervalle des deux limites est divisé en cent parties égales; dans le thermomètre de Réaumur, ce même intervalle est divisé en 80 parties égales; dans tous deux, le point de la glace

Par la dilatation.	fondanta est marquée 0°. Le thermomètre de Farenheit poete 32° à la glace fondante, et 212° à l'ébullition de l'eau; l'intervalle est par conséquent divisé en 180°. *Thermomètres à alcool.* Ils se construisent comme ceux à mercure. On les emploie principalement pour déterminer les basses températures. *Thermometres à air.* Sont composés d'un tube de thermometre dont la tige renferme une bulle de mercure. Ils sont influenceés par les variations baeométriques; on les emploie pour les basses températures. *Thermomètres métalliques.* Sont fondés sur l'inégale dilatation des métaux — Thermometre de Borda. — Thermometre métallique de M. Breguet. *Pyromètre de Wedgwood.* Il est fondé sur le retrait de l'argile qui parait croître avee la température. Il est amployé pour astimer les tempéeatures très élevées. *Thermometres a maximâ et à minimâ.* Celui qui est le plus commode est composé de deux thermomètres a tiges horizontales, l'un à mercura, l'autre à alcool; le premier renferme un petit cylindre d'acier que la colonne métallique pousse devant elle et abandonne au point le plus élevé de son excursion: l'autre à alcool renferme un petit cylindre d'émail qui reste toujours en dedans de la colonne liquide, et que eetta colonne abandonne au point le plus bas de son retrait. L'instrument de M. Gay-Lussac est fondé sur un principe different.
Par la méthode des mélanges.	Lorsqu'on mêle deux corps qui n'axercent l'un sur l'antre aucune action chimique, la température du mélange dépend de leue poids, de leurs températures initiales et de leurs capacités calorifiques; lorsqu'on connait cette températura et tous ces élémens, excepté la température de l'un des corps, on peut facilement la déterminer.

Sources de la Chaleur.

Chaleur solaire. La chaleur produite dépend de la durée du rayonnament et de l'inclination des rayons.
Chaleur centrale de la terre. Ella a maintenant très-peu d'iofluence sur la températnre de la surface du globe.
Pression et Percussion. C'est sur la ehaleur que dégage l'air par la percussion qua sont fondés les briquets pneumatiques.
Frottement. La chaleur dégagée par le frottement croît avec la vitesse.
Changement d'état des corps. La liquéfaction des vapeurs par la pression et la congélation des liqueurs par les actions chimiques produisent heaucoup de chaleur.
Actions Chimiques. Par le fait de la combinaison il y a toujours dégagement de chaleur, mais les changement d'état des corps, ainsi que les variations de capacité calorifique produisent de la chaleur ou du froid; le résultat est égal à la somme on à la différence da ces effets partiels.

Sources du Froid.

Dilatation des gaz. La dilatation des gaz par la diminution de pression produit beaucoup du froid.
Changement d'état des corps. Le changemens d'état qui produisent du froid, sont la vaporisation spontanée des liquides, et la liquéfaction des coeps solides par les actions chimiques.

CHAPITRE II.

De l'Électricité.

§ Ier.

Phénomènes généraux.

455. *Définition.* Lorsqu'on frotte un morceau de verre, de soufre, de résine, ou un bâton de cire d'Espagne, avec une étoffe de laine, on remarque que ces corps jouissent, après le frottement, de la propriété d'attirer les corps légers, tels que des barbes de plumes, de petits fragmens de papier. Cette propriété a été désignée sous le nom d'*électricité*, du nom grec de l'ambre (ἤλεκτρον), substance dans laquelle on l'a reconnue pour la première fois.

456. Les attractions dont nous venons de parler se manifestent souvent à des distances considérables, et ne sont point détruites par l'interposition des corps, de quelque nature qu'ils soient; elles deviennent bien plus énergiques quand on emploie des corps qui ont une grande surface et qu'on les frotte très-vivement. Pour cela on se sert de différens appareils qu'on désigne sous le nom de machines électriques et que nous décrirons plus tard. Au moyen de ces machines, on obtient non-seulement des attractions énergiques, mais les surfaces électrisées deviennent lumineuses dans l'obscurité; elles acquièrent une odeur de phosphore, et lorsqu'on en approche d'autres corps, avant le contact, il se manifeste une brillante étincelle.

457. *Inégalité de faculté conductrice des corps.* En général, lorsqu'un corps a été électrisé par le frottement, si on le touche avec la main, avec un métal quelconque, de l'eau, etc., il perd la faculté d'attirer les corps légers, et rentre dans l'état où il était avant le frottement; mais si on le touche avec du verre, du soufre, des résines, de la soie, il conserve sa faculté électrique. Pour expliquer ces faits, on a

admis que les phénomènes électriques étaient dus à un fluide très-subtil qui pouvait facilement s'échapper à travers certains corps, et qui ne se propageait que difficilement à travers les autres. Les premiers ont été désignés sous le nom de bons conducteurs, les autres sous celui de mauvais conducteurs.

458. Pour reconnaître les différences de faculté conductrice des corps, on emploie l'appareil suivant : A B (*fig.* 274) est un support en verre à l'extrémité duquel est suspendu une petite balle de moelle de sureau, au moyen d'un fil de soie très-fin; on fixe une petite boule métallique *n* (*fig.* 275) à l'extrémité d'un cylindre de la substance dont on veut connaître la faculté conductrice ; puis on électrise la boule *n* en la mettant en contact avec un cylindre de verre récemment frotté, et tenant l'appareil par le point *b*, on approche la boule de l'extrémité du petit pendule; s'il est dévié de sa direction, il est évident que le corps *a b* n'a pas laissé passer l'électricité, et par conséquent qu'il est mauvais conducteur, et que, dans le cas contraire, il conduit l'électricité. A la place du pendule on pourrait employer l'appareil (*fig.* 276) qui est composé d'une aiguille en verre très-mince, mobile autour de son centre, et dont les extrémités sont garnies de balles de sureau. Pour observer la conductibilité des substances liquides ou gazeuses, il faudrait se servir d'un tube de verre A B (*fig.* 277), terminé par une boule métallique : l'on remplirait le tube du liquide, ou du gaz, ou de la vapeur que l'on veut essayer, et on mettrait l'extrémité de la colonne fluide en communication avec la main par un fil métallique.

459. On a ainsi reconnu que toutes les substances vitreuses, résineuses, les liquides, les pierres, les briques, la terre sèche, la soie et les gaz secs, et en général toutes les substances qui deviennent immédiatement électriques par le frottement, étaient de très-mauvais conducteurs; et qu'au contraire l'eau, surtout celle qui est chargée de sels, presque tous les liquides, les gaz humides, le charbon calciné, les végétaux, les animaux, la terre humide et les métaux, sont de bons conducteurs.

460. Lorsqu'un corps est bon conducteur, l'électricité le parcourt avec

une rapidité extrême ; car il a été impossible d'apprécier le temps qu'elle a mis à traverser un espace de plusieurs milles.

461. Les corps mauvais conducteurs non-seulement ne laissent pas passer l'électricité, mais ils retiennent avec une certaine force celle qui leur a été communiquée, car il faut les toucher à plusieurs reprises avec un corps bon conducteur pour y détruire complètement la vertu électrique.

462. On dit qu'un corps est isolé, lorsqu'il est soutenu par un corps mauvais conducteur. Les corps que l'on emploie le plus fréquemment comme isoloirs, sont des cordons de soie, des tubes de verre recouverts de gomme laque, et surtout des cylindres de cette dernière substance.

463. Lorsque deux corps conducteurs sont isolés, et qu'après avoir électrisé l'un d'eux, on les met en communication, l'électricité se partage entre eux suivant des lois que nous exposerons plus tard ; celui qui n'a pas été électrisé en prend d'autant plus que sa surface est plus grande, de sorte que si elle était très-étendue, relativement à celle de l'autre, ce dernier ne conserverait pas d'électricité sensible ; c'est ce qui arrive lorsqu'un corps électrisé est en contact avec le sol, directement ou par l'intermédiaire de corps bons conducteurs. C'est pour cette raison que la terre est souvent désignée sous le nom de *réservoir commun.*

464. *Tous les corps sont électriques par le frottement.* Les corps que nous avons indiqués comme étant électriques par le frottement, sans être isolés, sont tous mauvais conducteurs, et c'est par cette raison que l'électricité que le frottement y a développée y est restée en partie ; mais on conçoit que si un corps conducteur était aussi électrique par le frottement, on ne pourrait pas reconnaître cette propriété en tenant ce corps à la main, car s'il s'électrisait, l'électricité s'écoulerait à mesure dans le réservoir commun, par la main et le corps qui sont aussi de bons conducteurs ; il faudrait nécessairement le tenir avec des gants de soie ou à l'extrémité de tiges de verre ou de résine. En opérant ainsi on a reconnu que tous les corps s'électrisaient par le frottement. On peut constater aisément le développement de l'électricité dans le frottement des corps liquides contre les corps solides ; en agitant du mercure dans un vase de verre, le vase se trouve électrisé ; en faisant monter rapidement

le mercure dans la chambre d'un baromètre le tube devient lumineux dans l'obscurité. On peut reconnaître l'influence du frottement des corps gazeux contre les corps solides en dirigeant le vent d'un soufflet contre une vitre ; cette dernière devient électrique. Quant à l'effet du frottement des liquides et des gaz entre eux, on n'a fait aucune expérience, mais il est infiniment probable qu'ils doivent aussi s'électriser. L'électricité dont l'atmosphère est souvent chargée, provient probablement du frottement de l'air contre lui-même ou contre les nuages par les vents.

Ainsi nous pouvons regarder comme démontré que tous les corps isolés par des corps non conducteurs s'électrisent par le frottement.

465. *Les électricités qui se développent dans deux corps isolés frottés l'un contre l'autre, sont de nature différente dans chacun d'eux. Les corps chargés d'électricité de même nature se repoussent, et ceux qui sont chargés d'électricité de nature différente s'attirent.* Lorsque deux corps isolés ont été frottés l'un contre l'autre, si on les approche chacun séparement du petit pendule A B (*fig.* 274), ou de l'aiguille (*fig.* 276), tous deux attirent les balles de sureau. Mais si on touche la boule du pendule avec un des corps, elle sera repoussée par ce corps et attirée par l'autre. On peut faire cette expérience au moyen de deux petits pendules (*fig.* 278), dont les supports A B et C D sont non conducteurs, et dont les boules légères *a* et *b* sont suspendues à des fils conducteurs communiquant à deux tiges métalliques, terminées par des boutons *m* et *n* ; si l'on met le même corps électrisé en contact avec les boutons *m* et *n* ; les balles *a* et *b* se repoussent ; et si on met un des corps en contact avec le bouton *m* et l'autre avec le bouton *n*, les deux balles s'attirent. On peut encore constater la répulsion existante entre deux corps électrisés de la même manière, au moyen du pendule double (*fig.* 279) ; en touchant avec un corps électrisé le bouton *m*, les deux balles entre lesquelles se partage l'électricité reçue se repoussent (*fig.* 280).

466 Les électricités mises en liberté sur les deux corps frottés, sont en proportions telles qu'elles peuvent se neutraliser complètement ; on peut facilement vérifier ce fait au moyen de deux disques de verre dépoli,

isolés et frottés : si on les met en contact, tout signe d'électricité disparaît, et si on les approche à la même distance et dans deux directions opposées d'un petit pendule, il reste en équilibre entre eux.

467. Ces deux espèces d'électricité qui se développent dans les corps sont fournies par le verre et la résine frottés avec des étoffes de laine ; c'est pourquoi l'une a été désignée sous le nom d'*électricité vitrée*, et l'autre d'*électricité résineuse*, ou d'*électricité positive* et d'*électricité négative* ; nous verrons plus tard la raison de cette dernière désignation.

468. L'espèce d'électricité que prend un corps par le frottement, dépend de sa nature et de celle de l'autre corps ; lorsqu'ils sont de même nature, elle dépend de la différence de leurs propriétés physiques, et quand ils sont identiques, elle dépend de certaines circonstances du frottement qu'il n'est pas toujours facile d'apprécier. Ainsi le verre frotté avec la laine s'électrise résineusement, et vitreusement avec la peau de chat ; le verre dépoli, frotté contre du verre poli s'électrise vitreusement ; de deux rubans de la même pièce frottés en croix, celui qui est frotté transversalement prend l'électricité résineuse ; si l'on frotte deux plaques de verre poli, chacune d'elles prend tantôt l'électricité vitrée, tantôt l'électricité résineuse (1). La température paraît aussi avoir une grande influence, car on a reconnu qu'un corps, dans les mêmes circonstances, tend d'autant plus à se charger d'électricité résineuse que sa température est plus élevée. Les substances suivantes prennent l'électricité vitrée lorsqu'elles sont frottées avec celles qui les suivent, et l'électricité résineuse avec celles qui précèdent.

Peau de chat.	Papier.
Verre poli.	Soie.
Étoffe de laine.	Gomme laque.
Plumes.	Verre dépoli.
Bois.	

(1) On fait ordinairement une expérience assez curieuse, fondée sur la double électrisation produite par le frottement. Deux personnes montent chacune sur un tabouret à pieds de verre, une d'elles avec une peau de chat frotte les habits de l'autre ; après une légère friction, toutes deux sont électrisées, la première résineusement, la seconde vitreusement, et toutes deux donnent des étincelles lorsqu'on en approche le doigt à une petite distance.

469. *Tous les corps renferment les fluides électriques vitreux et résineux à l'état de combinaison.* Pour expliquer les phénomènes que nous venons d'examiner, on a admis, comme une hypothèse très-probable, que les phénomènes électriques sont produits par deux fluides très-subtils, dont les molécules similaires se repoussent et ceux de nature différente s'attirent, et que tous les corps renferment à l'état de combinaison ces deux fluides, qui, par conséquent, ne peuvent point manifester leur présence; mais que, séparés par le frottement, ils se portent l'un dans un corps, l'autre dans l'autre, et manifestent leur présence par les attractions et les répulsions dont nous avons parlé. Nous verrons par la suite que cette hypothèse satisfait à tous les phénomènes.

470. *Les attractions et les répulsions électriques suivent la loi de la raison inverse des carrés des distances.* C'est à Coulomb que l'on doit la démonstration de ce fait important. Nous allons décrire avec détail l'ingénieux appareil qu'il a employé. L'appareil de Coulomb est fondé sur ce principe : si un fil métallique AB (*fig.* 281), suspendu par une de ses extrémités, supporte par l'autre un lévier horizontal, en faisant tourner le lévier dans son plan, le fil se tordra, et le lévier, abandonné à lui-même, en vertu de l'élasticité du fil, reviendra à sa position initiale, autour de laquelle il oscillera pendant un certain temps et à laquelle il finira par s'arrêter. Coulomb a reconnu, par des expériences nombreuses, que si la torsion ne changeait pas la contexture du fil, la force avec laquelle le fil tendait à se détordre, et, par conséquent, la force qu'il fallait employer pour l'empêcher de produire cet effet, était proportionnelle à l'angle de torsion, c'est-à-dire, à l'angle formé par le lévier CD dans sa première et dans sa nouvelle position C'D'.

471. L'appareil en question, que l'on désigne sous le nom de Balance de Coulomb, est composé (*fig* 282) d'un cylindre de verre AB d'environ un pied de diamètre, fermé par un plateau de verre AC, percé à son centre d'une ouverture circulaire sur laquelle est mastiqué un autre cylindre de verre DE d'un plus petit diamètre et d'une plus grande hauteur; à son extrémité se trouve une boîte en cuivre qui enveloppe le cylindre DE et peut tourner librement autour de lui; cette boîte est fermée supérieurement par une plaque métallique sur laquelle se trouve un cadran divisé en 360 parties égales; le centre de cette plaque est percé d'une ouverture dans laquelle s'engage à frottement libre un cylindre de cuivre, qui sert d'axe à l'aiguille *ab* et qui est terminé supérieurement par un bouton destiné à le faire mouvoir. L'axe de l'aiguille porte inférieurement une pince que l'on serre au moyen d'un anneau. Cette portion de l'appareil porte le nom de micromètre.

Un fil métallique très-fin *mn*, fixé supérieurement à la pince de l'axe de l'aiguille, supporte à sa partie inférieure une petite masse métallique, à travers laquelle s'engage un fil de gomme laque *cd* dont une des extrémités est armée d'une petite boule de moelle de sureau, et l'autre d'un disque de papier doré qui lui fait équilibre (la figure 284 présente, sur de plus grandes dimensions, l'axe du micromètre et le support du lévier *cd*). Le plateau AC est percé d'une autre ouverture O par laquelle on introduit une tige isolante, à l'extrémité de laquelle se trouve une petite boule métallique *d'*; le cylindre AB est revêtu extérieurement, à la hauteur du lévier *cd*, d'une bande de papier divisée en 360 parties égales, à partir de la boule *d'*.

472. Pour trouver la loi des répulsions électriques, Coulomb plaça l'aiguille du micromètre sur le zéro de la division, et fit tourner la boîte jusqu'à ce que la boule *d*, dans sa position naturelle, touchât la boule *d'*; ensuite il donna à la boule *d'* une faible tension électrique, et le tube à l'extrémité duquel elle est fixée fut introduit dans la balance par l'ouverture O; la boule *d* fut attirée d'abord par la boule *d'*, et, en la touchant, partagea son électricité, en fut repoussée, et le lévier *cd* resta en équilibre, lorsque la distance fut telle que la force répulsive faisait équilibre à la force de torsion. Dans une série d'expériences, l'angle du lévier avec sa première position mesurée sur la division du cylindre AB, était de 36°; en faisant mouvoir l'aiguille du micromètre de manière à faire rapprocher les boules, Coulomb reconnut que, pour diminuer de moitié leur distance, il fallait faire marcher l'aiguille de 126°; et pour que la distance des boules ne fût plus que le quart de ce qu'elle était d'abord, il fallait faire tourner la même aiguille de 567°. Il est évident que, dans ces deux dernières positions d'équilibre, la torsion du fil était égale à l'écart des deux boules, plus à l'angle décrit en sens contraire par le micromètre. Ainsi, les torsions étaient dans ces trois opérations 36°, 18 + 126 et 9 + 567, ou bien 36, 144 et 576 ; or, ces nombres sont entre eux comme 1, 4, 16, et comme les distances étaient 1, ½, ¼, il en résulte évidemment la loi énoncée. Dans ces expériences il y a cependant trois causes d'erreurs ; la première, c'est que la distance réelle des boules n'est pas mesurée par l'arc qui les sépare, mais par sa corde; la seconde, c'est que la force répulsive ne s'exerçant pas perpendiculairement au levier CD, une portion de cette force est détruite par l'obliquité du lévier; la troisième consiste en ce que les corps chargés d'électricité en perdent continuellement par le contact de l'air, et par conséquent la force répulsive doit diminuer pendant la durée des expériences. Les deux premières erreurs peuvent facilement se calculer, et en les introduisant dans les données des expériences citées, on trouve encore l'accord le plus satisfaisant avec la loi en question. Quant à la dernière, elle était très-petite le jour où furent faites les expériences, car les deux

boules, repoussées à une distance de 30°, ne se sont rapprochées que d'un demi-degré en deux minutes.

473. Les attractions électriques suivent la même loi que les répulsions; on peut le vérifier au moyen du même appareil : mais ces expériences exigent quelques précautions que nous allons détailler. Supposons que la boule *d* étant dans l'état naturel et en repos, on lui présente à une certaine distance la boule *d'* électrisée : la première se mettra en mouvement vers la seconde, et à mesure que leur distance diminuera, l'attraction augmentera en même temps que la force de torsion; mais pour savoir si, avant le contact, il existera une position d'équilibre stable, il faut examiner la nature des deux forces qui varient. Soit AB (*fig.* 285) la distance des deux boules, A la position de la boule mobile; si nous représentons l'attraction à une distance quelconque A'B par la perpendiculaire A'*m*, il est évident que les attractions, croissant en raison inverse du carré de la distance, seront représentées par les ordonnées de l'hyperbole équilatère XY, ayant pour asymptotes AB et BC, AX étant l'intensité de l'attraction à la distance AB; la force de torsion, croissant proportionnellement à la distance au point A, et étant nulle à ce point, sera représentée par les ordonnées d'une droite passant par le point A; le sinus de l'angle de cette droite avec AB est proportionnel à l'intensité de la force de torsion. A l'inspection de la figure, on voit que l'existence d'une position d'équilibre stable dépend de l'inclinaison de la droite AM sur AB; car si la droite ne coupe pas la courbe XY, il est évident qu'à aucune distance la force de torsion ne pourra égaler l'attraction; mais si cette droite coupe la courbe aux points *m* et *n*, il est évident qu'à la distance A'B il y aura un équilibre stable, et à la distance A"B un équilibre instantané. Ainsi, en prenant des fils dont la force de torsion serait très-grande relativement à l'attraction des deux boules, et en plaçant la boule *d* à une certaine distance angulaire de la boule *d'*, il existera toujours une position d'équilibre stable que l'on pourra observer, et en faisant mouvoir l'aiguille du micromètre de manière à faire rapprocher les boules, on aurait, comme dans les expériences de la répulsion, une série de positions d'équilibre dont on comparerait les distances et les torsions; mais comme il est indispensable, pour conserver à l'appareil toute sa sensibilité, d'avoir des fils dont la force de torsion soit très-faible, et que, d'ailleurs, la grande mobilité du lévier produit souvent de grandes oscillations, la boule mobile pourrait toucher la boule fixe, ce qui changerait l'attraction en répulsion; il vaut mieux employer le procédé suivant. Coulomb commençait par tendre verticalement, dans la cage AB (*fig.* 282), un fil qui empêchait la boule *d* de toucher la boule fixe, et après avoir donné une certaine tension électrique à cette dernière, il tournait l'aiguille du micromètre de manière à éloigner le bras du lévier *cd* du fil d'arrêt, et il observait les torsions correspondantes

à des distances 1, 2, 4, etc. Il a trouvé ainsi que les attractions suivaient exactement la loi des répulsions.

474. Coulomb a encore vérifié cette dernière loi par un procédé différent, qu'il est bon de connaître. Il remplaçait le fil métallique de suspension par un fil de soie tel qu'il sort du cocon, et à l'extrémité du lévier en gomme laque, il avait placé un petit cercle vertical de papier doré (la force de torsion était tellement petite, que celle d'une circonférence équivalait au poids d'un cent-vingt-millième de grain); à une certaine distance, il avait placé un globe métallique isolé chargé d'électricité; le lévier oscillait horizontalement par l'attraction du globe, comme un pendule ordinaire oscille verticalement par la pesanteur. La formule $T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ que nous avons donnée (72) est ici exactement applicable; seulement il faut y remplacer g par $\frac{F}{D^2}$, F étant l'intensité de l'attraction à l'unité de distance, et D la distance du disque doré au centre du globe électrisé; la formule devient alors $T = D \pi \sqrt{\frac{l}{F}}$. Ainsi, la durée des oscillations doit croître proportionnellement à la distance. Coulomb trouva, en effet, que les nombres d'oscillations dans le même temps étaient en raison inverse des distances.

475. Le même physicien a ensuite vérifié, par une expérience très-simple, que les intensités des attractions ou des répulsions électriques sont proportionnelles aux quantités d'électricité libre. L'expérience consiste à déterminer la tension d'une petite boule conductrice isolée, à la toucher avec une autre boule de même dimension également isolée; on trouve que toutes deux ont acquis la même tension, et qu'elle est la moitié de celle que possédait la première.

476. *Causes de la déperdition de l'électricité.* Lorsqu'un corps, conducteur isolé, est chargé d'électricité, la tension électrique diminue continuellement et finit par s'anéantir au bout d'un certain temps. Les causes de cette déperdition et les lois de leur influence sont importantes à connaître, afin de les éviter quand cela est possible, et, dans le cas contraire, pour corriger les résultats que l'on obtient dans toutes les expériences qui exigent un certain temps. Par exemple, dans les expériences de Coulomb pour déterminer la loi des répulsions électriques, si la perte de l'électricité avait été sensible dans l'intervalle des trois observations, les trois résultats n'auraient pu être comparés entre eux qu'après que les tensions correspondantes aux deux dernières auraient été ramenées par le calcul à ce qu'elles auraient été si la tension n'avait pas diminué.

477. Les causes de déperdition de l'électricité dans un corps conducteur isolé, sont: 1° l'humidité que l'air dépose sur les corps isolans et qui deviennent alors conducteurs; 2° la conductibilité des supports, car il paraît qu'il n'existe dans la nature aucun corps qui soit parfaitement isolant; 3° le contact de l'air. La pre-

mière cause de déperdition peut facilement être évitée en essuyant et dessérhant les corps non conducteurs, et opérant dans une atmosphère qui ne soit pas saturée d'humidité; mais il n'en est pas de même des deux dernières; il faut, par conséquent, déterminer les lois de leur influence.

478. *Loi de la déperdition de l'electricité par la seule influence de l'air.* Pour déterminer la loi dont il est question, il fallait d'abord un support qui isolât parfaitement le corps électrique, afin de le soustraire à toute influence étrangère à celle de l'air. Coulomb, après de nombreux essais, reconnut qu'un cylindre de cire d'Espagne ou de gomme laque, d'une demi-ligne de diamètre et de dix-huit à vingt lignes de longueur, suffit toujours pour isoler une balle de sureau de cinq à six lignes de diamètre, surtout lorsque la tension électrique n'est pas considérable. D'après cela, Coulomb fixa, dans sa balance, une balle de sureau à l'extrémité d'un lévier en gomme laque, et il plaça dans la caisse A B, par l'ouverture O (*fig.* 283), une autre boule de sureau, isolée de la même manière au moyen d'un cylindre de gomme laque; cette dernière fut faiblement électrisée; les deux boules, après s'être partagé cette électricité, furent repoussées. Dans une des séries d'expériences, la première répulsion avait été de 40°, et leur distance fut ramenée à 20° en tournant l'aiguille du micromètre de 140°; la force de torsion était alors de 160°. A mesure que la déperdition avait lieu, les deux boules se rapprorhaient; mais, pour estimer la perte de tension au bout d'un certain temps, on diminuait la torsion de manière à ramener les boules à leur distance initiale. Il est évident que la tension perdue était mesurée par le mouvement rétrograde que l'on avait imprimé à l'aiguille. Ainsi, dans l'expérience citée, au bout de trois minutes il avait fallu détordre le fil de 30°, et la torsion totale ne se trouvait plus que de 130°. Coulomb déterminait ensuite, au moyen des résultats de ces expériences, la perte d'électricité rapportée à la tension moyenne entre deux observations consécutives; par exemple, dans l'observation précédente, les tensions successives étant 160° et 130°, dont la moyenne est 145° et la perte 30° pour trois minutes, la perte pour une minute, relativement à la tension moyenne, était $\frac{10}{145}$.

479. A la suite d'un grand nombre d'expériences, Coulomb a reconnu les lois suivantes:

1° La déperdition de l'électririté par le contact de l'air dans les mêmes circonstances, est à rhaque instant une même fraction de la tension du corps, et dans un petit intervalle, une même frartion de la tension moyenne au commencement et à la fin.

2° La déperdition croît avec le degré d'humidité de l'air.

3° Dans l'air au même degré d'humidité, la déperdition d'électricité est la même, quelles que soient la grosseur, la forme et la nature des corps.

Il résulte de ces lois importantes que quand on doit faire des expériences sur les tensions électriques des corps, il faut commencer par déterminer, par des observations

préliminaires, la fraction qui représente la perte de l'électricité pendant une minute, et corriger de cette perte toutes les observations.

480. *Deperdition par les supports.* Nous avons dit précédemment qu'il n'existe aucun corps qui ne conduise plus ou moins l'électricité; on peut facilement constater ce fait, en formant des cylindres de différentes matières non cunductrices et les mettant en contact avec des corps électrisés; tous, après la séparation, auront acquis une certaine tension électrique que l'on pourra facilement reconnaître en les présentant à un petit pendule.

Il résulte des observations nombreuses de Coulomb, que la faculté conductrise des corps mauvais conducteurs croît rapidement avec la tension électrique, et diminue avec leur longueur, de sorte que pour chaque tension électrique, il y a pour chacun de ces corps une certaine longueur, pour laquelle l'isolement est complet. Coulomb a trouvé, pour les tensions et les lungueurs correspondant à l'isolement complet, la loi suivante :

481. Les longueurs auxquelles un même corps non conducteur de forme cylindrique commence à isoler complètement, sont proportionnelles aux carrés des tensions électriques.

482. Certains corps non conducteurs chargés d'électricité qu'on y a développé par le frottement, conservent pendant très-long-temps leurs tensions électriques, malgré le contact de l'air et des corps conducteurs, tels sont principalement des gâteaux de résine, qui, électrisés au moyen d'une peau de chat, sont encore électriques après plusieurs mois. Cet effet doit tenir, du moins en partie, à la difficulté que l'électricité éprouve à se dégager de ces corps. Mais il y a encore une autre cause qui concourt avec celle-là et dont il sera question à l'article des condensateurs.

483. *L'électricité est retenue à la surface des corps conducteurs par la pression de l'air.* Lorsqu'on place sous le récipient d'une machine pneumatique un corps conducteur isolé et électrisé, et que l'on fait le vide, toute l'életricité se dissipe et le corps ne possède plus après aucune tension électrique. Les corps non conducteurs et électrisés, placés dans le vide, conservent encore une certaine tension; ainsi dans les corps conducteurs, l'électricité est maintenue par la pression de l'air, et dans les corps non conducteurs, par cette même pression et par la difficulté que l'électricité éprouve à s'en dégager.

484. *Disposition de l'électricité libre à la surface d'un corps conducteur isolé.* L'électricité libre dans un corps conducteur est entièrement à sa surface; on peut le démontrer par plusieurs expériences: 1° en élec-



trisant une sphère creuse (*fig.* 286) percée d'une ouverture circulaire, et introduisant dans son intérieur un petit disque de papier doré *m*, supporté par un manche de gomme laque ; si à l'entrée et à la sortie ce petit disque n'a pas touché les parois de l'ouverture, il n'acquiert aucune tension électrique ; 2° en électrisant une sphère (*fig.* 287) suspendue à un fil de soie, et l'enveloppant ensuite de deux hémisphères creux métalliques de même rayon, que l'on soutient par des manches isolans ; en enlevant rapidement ces deux hémisphères, on trouve qu'ils possèdent toute l'électricité que l'on avait donnée d'abord au globe, car ce dernier n'a plus aucune tension ; 3° en prenant un corps conducteur, de forme quelconque, percé de cavités cylindriques, électrisant ce corps et introduisant dans les cavités le petit plan d'épreuve (*fig.* 286), de manière à l'appliquer sur le fond sans lui faire toucher les parois en entrant et en sortant ; on remarque qu'il n'acquiert aucune tension électrique.

485. L'électricité libre d'un corps réunie à sa surface, y forme une couche infiniment mince dont la tension varie en général d'un point à un autre. Elle est la même pour tous les points d'une surface sphérique, mais c'est le seul cas où cette uniformité de tension ait lieu ; dans les lames prismatiques, Coulomb a observé que la tension était sensiblement uniforme jusqu'à un pouce de distance des extrémités, et qu'au delà elle croissait avec une grande rapidité ; qu'il en était de même dans les corps cylindriques alongés, et que dans un ellipsoïde (*fig.* 288), la tension aux extrémités A et B du grand axe était beaucoup plus grande que dans tous les autres points ; que cette différence prenait des accroissemens très-rapides à mesure que le rapport des deux axes augmentait, et enfin que dans les corps terminés par des pointes, la tension y devenait excessivement grande, de sorte que cette tension pouvant toujours vaincre la résistance de l'air, l'électricité s'écoulait continuellement par les pointes comme un liquide d'un vase percé. Nous ferons plus tard d'utiles applications de cette propriété.

486. Les faits que nous venons de rapporter sont le résultat de l'observation ; ils ont depuis été vérifiés par l'analyse. Nous décrirons succinctement les moyens d'observation qui ont été employés, et les résultats principaux du calcul.

Le procédé employé par Coulomb pour déterminer les tensions des différens points de la surface d'un corps est fondé sur ce fait : si on met en contact avec un point quelconque d'un corps électrisé un disque de papier doré, soutenu par un manche de gomme laque, la tension qu'il aura acquise par le contact est proportionnelle à celle du point du corps qui a été touché. Coulomb vérifia ce principe par plusieurs procédés. Il prit d'abord un cylindre conducteur isolé et électrisé, et il le toucha en un point de sa surface avec le disque, qu'il porta dans la balance pour en mesurer la tension ; il le toucha de nouveau à plusieurs reprises, à plusieurs minutes de distance et au même point, et à chaque fois il mesura la tension acquise par le plan d'épreuve ; en comparant les tensions acquises successivement par le disque avec les tensions que le cylindre devait avoir aux mêmes instans par la déperdition de l'air, il trouva l'accord le plus satisfaisant ; en chargeant d'électricité un corps conducteur et le touchant d'abord avec le plan d'épreuve, le mettant en contact avec un corps isolé parfaitement égal pour la nature, la forme et les dimensions, et touchant de nouveau le premier après la séparation, il reconnut que, dans cette dernière expérience, la tension acquise par le disque était moitié de celle qu'il avait acquise par le premier contact : or, les tensions du cylindre en un même point devaient nécessairement être deux fois plus grandes dans le premier contact que dans le second, car le corps ayant été mis en contact avec un autre égal, l'électricité avait dû se partager également entre eux, et après le contact il devait avoir seulement la moitié de l'électricité qu'il possédait d'abord. Ainsi les tensions du disque sont proportionnelles à celles du point touché. Ce principe une fois reconnu, la détermination des tensions des divers points d'un corps électrisé ne présente aucune difficulté ; il suffit de le toucher successivement aux différens points dont on veut avoir les tensions, et de mesurer à chaque fois, au moyen de la balance de Coulomb, la tension du disque. On doit seulement avoir soin de prendre pour soutenir le disque une gomme laque bien isolante ; il faut pour cela qu'étant mise en contact avec un corps électrisé, après la séparation elle ne conserve aucune trace d'électricité ; il faut de plus tenir compte de la déperdition de l'électricité par le contact de l'air, ou, ce qui est beaucoup plus simple, après avoir déterminé la tension de deux points, déterminer de nouveau celle du premier, en laissant entre la seconde et la troisième observation le même temps qu'entre la première et la seconde, et prendre pour tension du premier point la moyenne des deux observations.

M. Poisson, en partant du principe que les attractions et les répulsions électriques ont lieu en raison inverse du carré de la distance, et que, dans un corps à la surface duquel l'électricité est en équilibre, l'action totale de la couche électrique sur un point quelconque de l'intérieur du corps doit être nulle (afin,



comme nous le verrons plus tard, qu'aucune nouvelle portion d'électricité ne soit développée), est parvenu à des formules qui représentent la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs électrisés, intégrables dans quelques cas particuliers, et qui alors se sont trouvées parfaitement d'accord avec les résultats numériques des expériences de Coulomb.

Il résulte de la théorie dont nous venons de parler, que, dans les corps électrisés bons conducteurs, l'électricité libre se trouve en totalité à la surface du corps, et forme une couche extrêmement mince dont la surface extérieure coïncide avec celle du corps, et dont la surface intérieure est parallèle à la première, si on admet que les variations de tensions électriques dans les différens points sont dues à une variation correspondante de densité; mais si on admet que ces variations proviennent de l'inégale épaisseur de la couche électrique, la surface électrique inférieure s'abaisse au-dessus de la première proportionnellement aux différences de tension. Ces hypothèses ne sont d'aucune importance, ni dans les expériences, ni dans les considérations purement théoriques; mais la dernière est plus probable que la première.

Dans un ellipsoïde à trois axes, les épaisseurs de la couche électrique aux trois sommets sont proportionnelles aux longueurs des axes qui passent par ces sommets Au sommet d'un cône, si l'électricité pouvait s'y maintenir, la tension serait infinie.

Dans deux sphères de diamètres différens en contact et électrisées dans cet état, l'épaisseur de la couche électrique est nulle aux points de contact, et le maximum d'épaisseur se trouve sur la ligne des centres aux points opposés. La distribution de l'électricité ne se fait point entre ces deux corps proportionnellement aux surfaces, ce qui supposerait que l'épaisseur de la couche électrique est la même dans les deux sphères; car l'épaisseur de la couche électrique est plus grande dans la plus petite sphère. Cette différence d'épaisseur croît à mesure que l'une des sphères devient plus petite; mais elle ne croît pas indéfiniment; le calcul donne pour la limite du rapport des épaisseurs le nombre 1,65, qui n'aurait réellement lieu que dans le cas où une des sphères serait infiniment petite relativement à l'autre.

La pression exercée sur l'air par la couche électrique est proportionnelle à la pression qui a lieu à la surface même et à l'épaisseur de la couche : or, comme chacun de ces élémens est proportionnel à l'autre, il en résulte que la pression exercée contre l'air est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique.

487. *Influence à distance de l'électricité libre à la surface d'un corps conducteur, sur un autre corps à l'état naturel.* Soit A (*fig.* 289) un corps conducteur électrisé et isolé, B un autre corps cylindrique également conducteur et isolé, mais à l'état naturel, et garni dans toute sa longueur de fils doubles portant à leur extrémité de petites balles de moelle de

sureau ; si on place ce dernier corps de manière que son extrémité *m* soit à une petite distance du premier, on observe le phénomènes suivans : 1° les boules de sureau s'écartent les unes des autres, et, par conséquent, le corps B est électrisé ; 2° la divergence des petits pendules est au maximum aux extrémités et va en diminuant à mesure qu'ils se rapprochent du centre ; par conséquent, l'électricité developpée par influence a une tension qui varie de la même manière ; 3° les électricités des extrémités *m* et *n* sont différentes : l'électricité de *m* est de nature contraire à celle du corps A, et l'électricité de *n* est de même nature ; 4° si pendant la durée de l'expérience, on essaie la tension d'un certain point de A, on la trouve plus petite que quand le corps A n'est pas dans le voisinage de B ; 5° à mesure qu'on éloigne le corps A, la divergence des fils diminue, et le point du corps B où la divergence est nulle se rapproche du point *m* ; 6° lorsque le corps B est entièrement soustrait à l'influence du corps A, tous deux rentrent dans l'état où ils étaient : le premier ne conserve aucune trace d'électricité, et le second a exactement la tension qu'il avait d'abord, diminuée cependant de la perte qu'il a faite pendant la durée de l'expérience, par le contact de l'air ; 7° en rapprochant de nouveau les corps A et B, les mêmes phénomènes se developpent ; 8° si, pendant que le corps B est électrisé par influence, on le touche en *n* avec un corps conducteur, la tension diminue en ce point, et après l'éloignement de A on trouve le corps B chargé de l'espèce d'électricité qui existait en *m* ; de même si on touchait le corps en *m*, le corps soustrait à l'influence de A serait chargé de l'espèce d'électricité qui était en *n* ; 9° si on touche le corps A, tout indice d'électricité disparaît dans le corps B.

Tous ces phénomènes s'expliquent d'une manière très-simple d'après les hypothèses que nous avons admises (468). En effet, le corps A étant chargé d'électricité vitrée, par exemple, doit agir à distance sur l'électricité naturelle renfermé dans le corps B, la décomposer, refouler dans la partie la plus éloignée l'électricité de même nature qu'il repousse, et attirer dans la partie du corps la plus voisine l'électricité de nom contraire. Cette séparation des électricités du corps B doit être d'autant plus grande

qu'il est plus voisin du corps A, et l'équilibre existe entre les attractions de ces deux fluides, et les attractions et les répulsions exercées par l'électricité de A; mais les électricités libres du corps B exercent nécessairement une réaction sur celle de A, et une partie de celle-ci se trouve neutralisée par cette action à distance; il résulte de là que la tension du corps A doit diminuer par l'influence de B et redevenir ce qu'elle était lorsque les deux corps sont suffisamment éloignés; que la tension des deux fluides séparés dans B doit être d'autant plus grande que la distance des deux corps est plus petite; que tous les phénomènes développés en B doivent disparaître lorsqu'on touche le corps A, ou qu'on l'éloigne suffisamment; et que si on enlève sur le corps B une portion d'une des deux électricités libres, elles ne se trouveront plus dans les proportions nécessaires pour se neutraliser, et par conséquent après l'éloignement de A, B sera chargé d'une électricité libre de nature contraire à celle qui a été enlevée.

488. M. Poisson est parvenu à déterminer les équations générales de la distribution des fluides électriques à la surface des corps soumis à leur influence mutuelle, au moyen de la condition suivante, qui doit toujours être satisfaite dans l'état d'équilibre: « Lorsque plusieurs corps conducteurs électrisés sont soumis à leur influence mutuelle « et sont parvenus à un état électrique permanent, la résultante des actions des cou» ches électriques sur un point quelconque, pris dans l'intérieur de l'un d'eux, « est nulle. » Ce principe est évident, car si la résultante de ces actions n'était pas nulle, elle produirait une nouvelle décomposition de fluide naturel et l'état électrique changerait, ce qui est contraire à l'hypothèse d'un état électrique permanent. Ce principe, traduit analytiquement, fournit autant d'équations que la question présente d'inconnues. Mais jusqu'ici ces équations n'ont pu être résolues que dans le cas particulier de deux sphères mises en contact ou en présence l'une de l'autre, et chargées primitivement d'une quantité quelconque d'électricité: le calcul conduit à un grand nombre de résultats qui ont été confirmés par l'expérience. Nous en rapporterons un très-remarquable: lorsque deux sphères d'inégale dimension ont été électrisées en contact, nous avons déjà dit que la tension au point de contact était nulle; mais si on les écarte, une partie de l'électricité de la petite sphère se décompose, et le point où le contact a eu lieu se charge d'un électricité contraire à celle de la grande sphère; cet effet diminue à mesure qu'on écarte les sphères, et devient nulle à une distance qui dépend du rapport de leur rayons; au delà de cette distance, le point où s'est fait le contact se retrouve dans l'état naturel; enfin, à une distance plus grande encore, ce point se

charge de la même espèce d'électricité que le reste de la sphère dont il fait partie. Toutes ces singulières alternatives et aux distances indiquées par le calcul ont été vérifiées par l'expérience.

489. *Explication des attractions et des répulsions apparentes des corps électrisés.* Connaissant les phénomènes qui se développent dans les corps par l'influence à distance, il est maintenant très-facile d'expliquer les attractions et les répulsions apparentes qui se manifestent entre les corps par l'électricité dont ils sont chargés.

Supposons deux corps de forme sphérique A et B : il peut se présenter un grand nombre de cas, suivant que l'un ou l'autre, ou tous deux, sont bons ou mauvais conducteurs et suivant l'espèce d'électricité dont ils sont chargés ; nous n'examinerons qu'un petit nombre de ces cas, l'explication des autres s'en déduira facilement. Admettons d'abord que les deux corps soient mauvais conducteurs et chargés de deux espèces d'électricité différentes ; les couches électriques étant retenues à leur surface par la force inconnue qui empêche la conductibilité, et ayant la propriété de s'attirer, elles entraîneront nécessairement dans leur mouvement la masse à laquelle elles sont adhérentes, pourvu que le poids de cette masse ou toute autre résistance ne s'y oppose ; et pendant le rapprochement chacun des corps conservera le même état électrique. Si A et B sont tous deux bons conducteurs et chargés d'électricité différente, les deux couches électriques qui sont à leur surface n'y sont maintenues que par la pression de l'air ; par conséquent, les corps ne participeront aux mouvemens que tendent à prendre leurs couches électriques qu'autant que leurs poids seront plus faibles que les résistances que peuvent vaincre les attractions, et encore qu'autant que la pression exercée sur l'air par ces couches sera plus petite que la pression de l'air, car alors les électricités abandonneraient les deux corps pour se combiner, et les corps resteraient à l'état naturel. Dans le cas dont il s'agit, à mesure que les sphères A et B se rapprochent, les épaisseurs des couches électriques augmentent dans les points les plus voisins, et à une certaine distance dépendante des épaisseurs initiales de ces couches, les électricités abandonnent toujours les deux corps ; mais pendant le rapprochement, il y

a toujours dans chacun d'eux, par l'influence de l'autre, une décomposition croissante du fluide électrique naturel qui augmente d'autant les attractions. Si les deux corps étant bons conducteurs, un seul se trouvait électrisé, ce dernier opérerait à distance la décomposition du fluide naturel du premier ; sa surface serait alors recouverte de deux couches électriques de natures différentes partant d'un cercle commun perpendiculaire à la ligne qui joint les centres des deux sphères, où l'épaisseur commune serait nulle et de là irait en croissant jusqu'aux points placés sur la ligne des centres : l'attraction apparente des deux corps résulterait de l'attraction de l'électricité de A sur la couche électrique de B, la plus voisine, et qui serait de nature contraire. Enfin, si un des corps seulement était bon conducteur et électrisé, l'autre étant dans l'état naturel, l'attraction serait lente à se développer, et d'autant plus que le dernier corps serait plus mauvais conducteur, parce que la séparation des électricités par l'influence à distance ne s'y ferait que très-difficilement ; c'est ce qu'il est très-facile de vérifier en présentant un corps électrisé à une boule de gomme laque suspendue à l'extrémité d'un fil : l'attraction ne se manifeste qu'au bout d'un certain temps. Toutes ces conséquences théoriques sont parfaitement confirmées par l'expérience.

La répulsion de deux corps bons conducteurs présente un phénomène singulier dont l'explication se déduit facilement de ce qui précède. Il consiste en ce que, si l'on force à se rapprocher deux corps qui sont chargés de la même espèce d'électricité, il arrive toujours, lorsqu'un des corps est très-petit relativement à l'autre, qu'à une certaine distance la répulsion se change en attraction. La cause de ce changement réside dans le développement de l'électricité par influence : car l'électricité de nature contraire à celle qui existe dans le corps le plus volumineux, et qui se forme dans le plus petit, croissant à mesure que la distance diminue, il doit nécessairement exister une distance à laquelle cette attraction est plus grande que la répulsion provenant de la couche électrique qui existait d'abord, jointe à celle de même espèce qui a été produite par influence, mais qui est refoulée dans la partie du corps la plus éloignée.

490. Il résulte de ce qui précède que toutes les attractions et répulsions apparentes des corps par l'influence électrique sont uniquement le résultat des attractions et des répulsions des couches électriques qui existent ou se développent à leur surface. Les corps participent à ces

mouvemens, parce que les couches électriques sont maintenues à leur surface, ou par adhérence, s'ils sont mauvais conducteurs, ou par la pression de l'air, s'ils sont bons conducteurs.

491. *Explosions électriques.* Lorsque deux corps électrisés sont voisins et que les couches électriques de nature différente qui les recouvrent, exercent sur l'air une pression plus considérable que sa force élastique, ces deux électricités quittent la surface des corps, se portent l'un sur l'autre et se combinent. Ce phénomène est accompagné de chaleur et de lumière; et lorsque la réunion de ces fluides a lieu à travers nos organes, nous éprouvons une sensation pénible plus ou moins vive et qui se fait principalement sentir dans les articulations. Nos connaissances relatives à l'influence de l'électricité sur nos organes se réduisent au fait que nous venons de citer; quant aux effets physiques de l'explosion, nous les examinerons plus tard avec détail.

492. L'explication que nous venons de donner des phénomènes généraux de l'électricité repose sur l'hypothèse de l'existence de deux fluides dont les parties similaires se repoussent et celles de nature différente s'attirent. Franklin a le premier imaginé d'expliquer les phénomènes électriques en n'admettant qu'un seul fluide. Les corps à l'état naturel en renfermeraient une certaine quantité qui ne manifesterait point sa présence; mais si elle était augmentée ou diminuée, elle agirait comme les corps électrisés vitreusement et résineusement. Ces deux états différens étaient désignés sous les noms de positifs et de négatifs. Cette théorie, qui paraît plus simple que celle que nous avons adoptée, est cependant beaucoup plus compliquée; car Œpinus et Cavendish, qui examinèrent cette hypothèse et la suivirent dans toutes ses conséquences, reconnurent qu'elle pouvait rendre compte des principaux phénomènes électriques, mais que pour cela il fallait admettre une attraction entre les corps et le fluide électrique, et de plus une répulsion entre les molécules des corps solides sensible à toute distance; mais en admettant ces nouvelles hypothèses, qui sont très-peu probables, il faudrait pouvoir en déduire par le calcul, comme cela a été fait pour l'hypothèse des deux fluides, les lois de la distribution du fluide électrique à la surface des corps; et comme l'expérience a confirmé celles qui ont été déduites de l'hypothèse des deux fluides, il faudrait nécessairement qu'on fût conduit aux mêmes lois, ce qui est bien peu probable, vu la complication des élémens de la solution du problème. Au reste, cette hypothèse expliquât-elle les phénomènes et conduisît-elle aux résultats numériques donnés par l'observation aussi bien que celle des deux fluides, cette dernière devrait encore être préférée comme beaucoup plus simple.

§ II.

Appareils électriques.

493. *Machines électriques.* La plupart des phénomènes que nous avons décrits n'exigeant que de faibles tensions électriques, le frottement d'un cylindre de verre ou de cire d'Espagne contre un morceau de drap tenu à la main était suffisant pour développer les petites quantités d'électricité nécessaires à leur manifestation; mais, pour un grand nombre d'expériences qui nous restent à décrire, il est nécessaire d'avoir de puissans appareils.

La machine électrique la plus ordinaire est composée (*fig.* 290) d'un plateau de verre circulaire et vertical, mobile sur son axe et qui dans sa rotation frotte contre quatre coussins *m* en crin, recouverts de peau et fixés aux montans qui supportent cet axe; un cylindre creux en cuivre MN, monté sur des supports isolans, se termine par deux branches dont les extrémités garnies de pointes embrassent le plateau; lorsqu'on fait tourner la machine au moyen de la manivelle ABC, le frottement du verre contre les coussins développe deux espèces d'électricité; l'électricité vitrée se répand sur la surface du plateau, et l'électricité résineuse passe dans les coussins et se dissipe dans le sol avec lequel ils communiquent. L'électricité vitrée du plateau décompose à distance l'électricité naturelle du conducteur MN; l'électricité résineuse, qui est attirée dans la partie du conducteur la plus voisine du plateau, s'écoule par les pointes dont elle est armée sur le verre, où elle forme du fluide naturel; alors la partie opposée du conducteur se charge d'une quantité correspondante de fluide vitreux; sa tension va continuellement en augmentant jusqu'à ce qu'elle puisse vaincre la résistance de l'air. Pour qu'une semblable machine fournisse le plus d'électricité possible dans les mêmes circonstances, il y a plusieurs conditions, qu'il est important de connaître : 1° les coussins doivent être frottés d'or mussif ou d'un alliage formé avec deux parties d'étain, quatre de zinc et sept de mercure; car l'expérience a fait reconnaître que le frottement du cuir

nu sur le verre développait beaucoup moins d'électricité que quand il avait été recouvert des substances dont nous venons de parler ; 2° les coussins doivent communiquer avec le sol ; car c'est encore un fait d'expérience que deux corps isolés donnent beaucoup moins d'électricité par leur frottement que quand l'un d'eux communique avec le sol (1) ; 3° il doit y avoir autant de branches garnies de pointes qu'il y a de paires de coussins, afin que la portion du plateau qui se présente au frottoir soit toujours à l'état naturel ; 4° le conducteur, excepté l'extrémité des branches qui enveloppent le plateau, ne doit renfermer aucune pointe ni aucun corps aigu ; car la tension y deviendrait beaucoup plus grande que dans le reste du conducteur, et le fluide s'écoulerait continuellement dans l'air par leurs extrémités ; 5° le conducteur doit être supporté par des corps très-isolans, comme des cylindres de verre enduits de gomme laque ; 6° pour éviter la déperdition d'électricité du plateau par l'air dans le trajet du frottoir aux pointes du conducteur, on fixe contre les montans qui en supportent l'axe des quarts de cercle en taffetas gommé (*fig.* 291) ; ou bien on incline les tiges du conducteur de manière que les pointes soient voisines des frottoirs.

494. Pour recueillir une plus grande portion d'électricité, on emploie souvent un système de tringles de cuivre ou des tuyaux de fer-blanc terminés par des boules, disposés comme l'indique la figure 290, et qui sont suspendus au plafond par des cordons de soie ; on fait communiquer cet appareil avec le conducteur de la machine par une tringle métallique, et on le charge en même temps que ce dernier, et si avant d'arrêter le mouvement du plateau, on enlève, avec une tige de verre ou tout

---

(1) La raison en est assez facile à saisir : en effet, soit A et B deux corps isolés qui, par leur frottement, mettent en liberté des quantités de fluides vitreux et résineux, que je représenterai par $+a$ et $-a$ (j'emploie la même lettre avec des signes différens pour indiquer que ces quantités se neutralisent mutuellement). Ces électricités tendent à se combiner, et cette tendance augmentant à mesure que le frottement en développe une plus grande quantité, il en résulte que l'influence du frottement pour décomposer une nouvelle quantité de fluide naturel ira en décroissant et deviendra nulle, lorsque l'attraction des fluides libres sera égale à la force que produit le frottement pour décomposer un fluide naturel ; mais si l'un des deux fluides peut se dégager, l'autre, en agissant par influence, concourra avec le frottement pour opérer de nouvelles décompositions du fluide naturel.

autre corps isolant, la tige de communication, le système des tringles conserve l'électricité qui lui a été communiquée, tandis que le conducteur la perd par les pointes dont il est armé.

495. La machine que nous venons de décrire ne donne que de l'électricité vitrée ; si on voulait avoir de l'électricité résineuse, il faudrait placer à l'extrémité du conducteur chargé d'électricité vitrée, un autre conducteur A B (*fig.* 292) isolé, et garni à l'extrémité opposée de plusieurs pointes; le premier conducteur agissant par influence sur le dernier, le chargerait en A d'électricité résineuse, et en B d'électricité vitrée qui s'écoulerait continuellement par les pointes.

496. Van-Marum, de Harlem, a imaginé une construction de machine qui donne à volonté de l'électricité vitrée ou de l'électricité résineuse. Il est représenté (*fig.* 293 et 294). Pour obtenir de l'électricité vitrée sur le conducteur M (*fig.* 294), les deux branches A et B sont disposées verticalement, et les deux branches C et D touchent les frottoirs, pour établir leur communication avec le sol; lorsqu'on veut avoir de l'électricité résineuse (*fig.* 295), on place horizontalement les branches A et B, de manière qu'elles communiquent avec les frottoirs, et les branches C D verticalement, pour qu'elles déchargent le plateau.

497. On pourrait facilement faire des machines à électricité résineuse en faisant frotter du taffetas ciré sur de la peau de chat; la fig. 295 représente la disposition la plus simple de cet appareil.

498. Dans les premières machines électriques, on employait des globes ou des cylindres de verre que l'on faisait tourner sur leur axe. C'est Ramsden qui le premier leur a substitué les plateaux de glace.

499. On fait ordinairement avec les machines électriques quelques expériences dont les effets s'expliquent facilement au moyen de la théorie que nous avons exposée.

Si, sur le conducteur d'une machine électrique (*fig.* 296), on place une tige *a b* sur laquelle repose une aiguille métallique terminée par deux pointes inclinées en sens contraire sur sa direction, lorsqu'on fait mouvoir le plateau de la machine, l'aiguille tourne en sens contraire de la direction des pointes. Ce phénomène est de même nature que celui que nous avons observé (221) (266) pour les liquides et les gaz ; en effet, la couche d'air qui environne un corps électrisé peut être considérée comme

un vase qui retient ce fluide, mais dont les parois ne sont susceptibles que d'une résistance limitée; si en un point quelconque de la surface, la tension électrique l'emporte sur cette résistance, le vase est percé, le fluide s'écoule et la pression sur le point opposé du vase doit produire un mouvement en sens contraire de l'écoulement.

500. Lorsque l'on place à l'extrémité du conducteur un plateau métallique A B (*fig.* 297), communiquant avec lui, et au-dessous, un autre C D en communication avec le sol; si l'on met entre eux un corps léger *m n* lesté en *n*, la machine étant en mouvement, le corps *m n* sera attiré vers A B, et aussitôt qu'il l'aura touché il en sera repoussé comme possédant la même espèce d'électricité; en retombant sur le plateau C D, il reviendra à l'état naturel, et sera de nouveau attiré et repoussé tant que la machine sera en mouvement.

501. A B (*fig.* 298) est une tige métallique, communiquant avec le conducteur et supportant trois timbres C, D, E, le premier et le troisième par des chaînes métalliques, et celui du milieu par un cordon de soie; ce dernier communique avec le sol par la chaîne *g*; entre les timbres extrêmes et celui du milieu sont suspendues, par des cordons de soie, deux petites boules de cuivre *a* et *b*. Lorsqu'on fait tourner la machine, la boule *a* se meut entre les timbre C et D, et la boule *b* entre les timbres D et E, comme le corps *m n* de l'expérience précédente entre le plateau A B et C D. Cet appareil porte le nom de *Carillon électrique*.

502. *Electrophore*. Cet appareil est composé (*fig.* 299) d'un gâteau de résine à surface bien plane, renfermé dans une enveloppe métallique A B, et d'un disque métallique C D d'un diamètre un peu plus petit, armé d'un manche isolant EF. Pour se servir de cet appareil, on frotte le gâteau de résine avec une peau de chat, et on place le disque C D sur le gâteau : l'électricité résineuse dont la résine a été chargée par le frottement, décompose le fluide naturel du plateau métallique, l'électricité vitrée se répand sur la face inférieure et l'électricité résineuse sur la face supérieure; (le fluide vitreux du plateau ne se combine pas avec le fluide résineux du gâteau, à cause de la difficulté que ce fluide éprouve à se mouvoir dans la résine); si on soulève le plateau, ses deux électricités se combineront, et tout rentrera dans l'état

initial ; mais si avant de soulever le plateau, on touche sa surface supérieure avec le doigt, il possédera toute l'électricité libre qui était répandue sur la surface inférieure ; et comme dans les actions exercées par le gâteau celui-ci ne perd que très-lentement son électricité, l'expérience pourra être répétée un grand nombre de fois de suite ; mais à la fin l'électricité du gâteau finira par disparaître. On peut disposer l'appareil de manière à obtenir des étincelles sans être obligé de toucher le plateau ; il suffit pour cela de coller contre le gâteau (*fig.* 300) une petite bande d'étain laminé qui communique avec le sol, ou seulement avec l'enveloppe du gâteau ; il est évident que par cette disposition, c'est comme si on touchait la face inférieure du plateau : l'électricité qu'on obtient alors est évidemment résineuse. On pourrait aussi charger la résine d'électricité vitrée, en mettant le gâteau en contact avec le conducteur d'une machine électrique ; les mêmes phénomènes auraient lieu (1). Des plateaux de 4 à 5 pouces de diamètre donnent, à l'approche du doigt ou d'un corps conducteur, des étincelles très-visibles en plein jour. Ces appareils conservent souvent l'électricité pendant plusieurs mois, tant la résine laisse difficilement dégager l'électricité dont elle est chargée ; ils sont souvent employés dans les laboratoires de chimie pour les expériences eudriométriques. (Voyez *Cours de Chimie*, pag. 27).

Condensateurs. Soit A et B (*fig.* 301) deux plateaux métalliques communiquant le premier avec le conducteur d'une machine électrique, le second avec le sol, et séparés l'un de l'autre par un disque de verre d'un plus grand diamètre. Supposons que la machine produise de l'élec-

(1) Pour mettre en évidence l'espece d'adhérence qui existe entre la résine et les deux fluides électriques, on fait une expérience curieuse, que nous allons rapporter. Sur la surface d'un plateau de résine on trace, evec un corps conducteur chargé d'électricité, des caractères quelconques ; l'électricité reste sur ces lignes ; car si l'on jette sur le plateau une poudre d'un corps non conducteur, et qu'on l'incline ensuite, la poudre restera fixée au plateau sur les lignes parcourues par le corps électrisé ; on rend cette expérience encore plus piquante en traçant des caractères avec deux espèces d'électricité, et injectant sur la surface, au moyen d'un petit soufflet, un mélange de soufre et de minium ; le soufre se fixe sur les traits chargés d'électricité résineuse, et le minium sur les traits d'electricité vitrée ; par conséquent, les premiers caractères sont jaunes et les derniers sont rouges. Cette séparation provient de ce que, dans la trituration du soufre et du minium, le premier prend l'électricité vitrée, et le second l'électricité résineuse.

tricité vitrée, le plateau A prendra de l'électricité vitrée, mais il se chargera beaucoup plus que s'il ne faisait pas partie de l'appareil que nous venons de décrire. En effet, l'électricité vitrée du plateau A agira à distance et à travers le disque de verre sur le plateau B, décomposera son électricité naturelle et attirera contre le disque de l'électricité résineuse. Représentons par V l'électricité du premier plateau, et par R l'électricité du second; V sera nécessairement plus grand que R, car cette dernière, étant neutralisée par la première à la distance de l'épaisseur du verre, sera plus petite que celle qui le serait au contact; réciproquement, R, en agissant sur V, en neutralise une partie, mais qui sera plus petite que celle qu'il neutraliserait au contact, et par conséquent plus petite que V. Ainsi, dans la quantité d'électricité renfermée dans le premier plateau, il y en aura une partie de dissimulée par l'électricité du plateau inférieur. La portion d'électricité libre de A sera évidemment d'autant plus grande, que la quantité totale d'électricité sera plus considérable; par conséquent, en supposant que la machine fournisse toujours de l'électricité, la charge du plateau A deviendra stationnaire lorsque la portion d'électricité libre deviendra égale à celle qu'il acquerrait s'il communiquait avec le conducteur sans faire partie de l'appareil. Si le plateau inférieur ne communiquait pas avec le sol, l'appareil se chargerait peu, parce que le fluide vitreux du plateau inférieur ne pourrait pas se dégager et exercerait une action répulsive sur la charge du plateau supérieur. Toutes ces conséquences théoriques sont parfaitement confirmées par l'expérience. En effet, si on isole les deux plateaux en enlevant le conducteur *a b* et la chaîne *c d*, et qu'on les sépare, on les trouvera chargés d'électricités différentes; et si on met en communication les deux plateaux au moyen de l'appareil (*fig.* 302) que l'on nomme excitateur (c'est un conducteur dont les extrémités peuvent être rapprochées au moyen d'une charnière, et que l'on tient par des manches isolans), en appliquant un des boutons contre un des plateaux, et approchant l'autre bouton de l'autre plateau, il se fait à une petite distance une violente explosion, et si on met les plateaux en contact par les mains ou tout autre partie du corps, on éprouve une vive com-

motion qui se fait principalement sentir dans les articulations. Cet effet se fait même sentir à travers une chaîne composée d'un nombre quelconque de personnes dont les extrémités sont en contact avec les deux plateaux. Lorsqu'un condensateur a été ainsi déchargé, par de nouveaux contacts successifs au moyen de l'excitateur on obtient encore des étincelles, parce qu'une partie des électricités accumulées contre les faces opposées de la lame de verre avait pénétré dans cette lame, et ne s'en dégage que difficilement; car si, après avoir isolé l'appareil, séparé la lame de verre et déchargé les plateaux, on remonte l'appareil, il se trouvera chargé de nouveau, et donnera des étincelles par l'excitateur.

Lorsqu'un condensateur chargé d'électricité est isolé, on peut le décharger en touchant successivement les deux plateaux. En effet, le plateau A renfermant de l'électricité libre, la cèdera entièrement si on le touche avec un corps communiquant avec le réservoir commun; mais alors toute l'électricité de B ne sera plus dissimulée; par conséquent, B donnera aussi à son tour une portion d'électricité par le contact; par la même raison, A, par la diminution d'électricité de B, acquerra une portion nouvelle d'électricité libre, et ainsi de suite. Ainsi, par ces contacts successifs, on parviendra à décharger complètement l'appareil, ce qui est parfaitement d'accord avec l'expérience.

La quantité d'électricité qui peut s'accumuler dans un condensateur, est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la surface des plateaux, et en raison inverse de l'épaisseur de la lame isolante; il semblerait, d'après cela, que l'on pourrait augmenter indéfiniment la faculté condensante d'un appareil, en diminuant convenablement l'épaisseur de la plaque isolante; mais il n'en est pas ainsi : car si son épaisseur est très-petite relativement à la tension des électricités qui la pressent, les couches électriques la brisent. On peut se servir pour corps isolant, de verre, de résine, de taffetas gommé, et même d'une couche de vernis, dont on enduit les faces de contact des deux plateaux. Les condensateurs de taffetas gommé ont le grand inconvénient de n'être pas comparables, parce que, par la pression, le taffetas gommé développe de l'électricité; les derniers ne sont employés que pour accumuler de petites doses d'élec-

tricité qui, par leur réunion, ne produisent que de faibles tensions. On pourrait aussi employer une couche d'air, en séparant les deux plateaux par un petite intervalle ; la limite de la saturation aurait évidemment lieu lorsque l'attraction des deux électricités pourrait vaincre la pression de l'atmosphère ; la charge de l'appareil serait beaucoup plus petite que dans les autres cas. Quelle que soit d'ailleurs la nature du corps isolant employé, il faut, pour éviter la décharge latérale, que le disque isolant ait un plus grand diamètre que les plateaux.

503. La force condensante d'un condensateur est représentée par le rapport entre la quantité totale d'électricité que possède le plateau supérieur et celle qui s'y trouve libre. On peut facilement trouver ce rapport en touchant ce plateau avec un petit plan d'épreuve, d'abord lorsqu'il est appliqué sur la lame isolante, et ensuite lorsqu'il en est séparé, et déterminant la tension du plan d'épreuve au moyen de la balance de Coulomb ; il faudrait avoir soin de ne pas charger trop le condensateur, afin que, les plateaux étant séparés, la tension fût plus petite que la pression de l'air. On peut aussi la déterminer au moyen du rapport des tensions des deux plateaux lorsqu'ils sont séparés. Il est infiniment probable que l'électricité est retenue si fortement dans les corps non conducteurs, en partie du moins, par une action analogue à celle qui a lieu dans les condensateurs ; l'électricité libre doit décomposer le fluide naturel intérieur, et la difficulté que le fluide éprouve à se mouvoir doit les maintenir comme dans un condensateur.

504. L'appareil que l'on désigne sous le nom de *Bouteille de Leyde* (*fig.* 303) est composé d'un flacon rempli d'or en feuille, d'étain laminé, ou de toute autre matière conductrice, fermé par un bouchon recouvert de vernis à la gomme laque ou de cire d'Espagne, à travers lequel passe une tige terminée inférieurement par une pointe, et supérieurement par un bouton ; la surface extérieure jusqu'à la hauteur *ab* est recouverte d'une feuille d'étain ; le métal enveloppant porte le nom d'armure extérieure, et celui qui est dans le flacon, ainsi que la tige *ab*, sont désignés sous le nom d'armure intérieure. Il est évident que cet appareil est de même nature que les condensateurs ; car il est formé de deux corps conducteurs séparés par une lame isolante. Par conséquent, tout ce que nous avons dit des condensateurs est applicable aux bouteilles de Leyde. Ainsi, pour les charger, il faut qu'une des deux armures soit en contact avec le sol ; on peut les décharger en mettant

les deux armures en contact, ou en les touchant alternativement, etc. Ces appareils sont principalement employés pour produire de violentes commotions ou des combustions; nous les examinerons plus tard sous ce rapport. Ils sont très-commodes pour se procurer à volonté les deux électricités; pour cela on isole une bouteille de Leyde chargée, et en touchant alternativement les deux armures, on obtient successivement les deux espèces de fluides électriques.

505. Lorsqu'une bouteille de Leyde chargée est isolée et abandonnée à l'action de l'air, l'armure par laquelle elle a été chargée étant la seule qui possède de l'électricité libre, perd seule de l'électricité; mais aussitôt que la tension de cette armure a commencé à diminuer, l'électricité de l'autre ne se trouve plus dissimulée en totalité; il s'y développe donc de l'électricité libre, et elle commence à son tour à perdre par le contact de l'air. On a reconnu par l'expérience que l'armure dont l'électricité était totalement dissimulée, acquiert une tension croissante jusqu'à ce qu'elle ait atteint celle de l'autre armure, et qu'alors ces deux tensions décroissent ensemble jusqu'à ce que la totalité de l'électricité se soit dissipée.

506. *Piles électriques.* Lorsque l'on forme une chaîne avec un grand nombre de bouteilles de Leyde (*fig.* 304) dont chaque armure extérieure communique avec l'armure intérieure de la suivante, si on fait communiquer l'armure intérieure de la première avec le conducteur d'une machine électrique donnant de l'électricité vitrée, et l'armure extérieure de la dernière avec le sol, toutes se chargeront vitreusement en dedans et résineusement en dehors. En effet, la charge vitrée intérieure de la première refoulera dans la seconde le fluide vitreux, tandis qu'elle attirera contre la surface du verre l'électricité résineuse; la seconde agira de même sur la troisième, et ainsi de suite; et il est évident que les charges iront en diminuant à partir de la première. Si on isole cet appareil chargé à saturation, la déperdition de l'électricité par le contact finit par établir des tensions sur toutes les bouteilles, qui, au bout d'un certain temps, se trouvent disposées comme il suit : les tensions sont de nature différente dans les deux moitiés de l'appareil; elles sont égales pour deux bouteilles également éloignées des extrémités, et croissent du centre vers les extrémités; de sorte que la première et la dernière ont des tensions égales, mais de nature contraire, qui se manifestent sur l'armure intérieure de la première et sur l'armure extérieure de la dernière. Si on divise la série en plusieurs parties, l'électricité dans chacune d'elles finira par se répartir de la même manière que dans la série totale. Ces faits, qui sont le résultat du calcul, sont parfaitement confirmés par l'expérience. Si l'on superpose une suite de condensateurs (*fig.* 305), il est évident que l'on obtiendra un appareil absolument semblable à la série de bouteilles de Leyde dont nous venons

de parler, qui se chargera de la même manière et sur lequel la déperdition d'électricité par l'air établira la même loi de tension. Ces derniers appareils portent le nom de *Piles électriques*; nous en verrons bientôt d'importantes applications.

Électroscopes. Ces instrumens ont pour objet de découvrir dans les corps de très-petites quantités d'électricité; tous sont fondés sur les attractions et les répulsions qui se manifestent dans les corps légers par les fluides électriques qu'ils renferment. Les appareils *fig.* 274, 276 et 279 sont les électroscopes les plus simples; le dernier est plus souvent employé que les autres. Pour soustraire les mouvemens à l'influence de l'air, on dispose l'appareil dans un petit flacon (*fig.* 306 et 307); les corps qui doivent s'écarter par l'influence électrique sont ou des brins de paille ou de minces fils métalliques dont les extrémités sont garnies de boules de moelle de sureau. Mais de tous les électroscopes, le seul qui donne des indications comparables et d'où l'on puisse déduire l'intensité des tensions électriques, c'est celui de *Coulomb* (*fig.* 308). Cet appareil est une véritable balance électrique dans laquelle on a supprimé le tube DE (*fig.* 282), et le cylindre conducteur passe à travers l'épaisseur du verre. Au moyen des électroscopes (*fig.* 274 et 276), on reconnaît la présence de l'électricité dans un corps par le mouvement des boules vers le corps lorsqu'on l'approche à une petite distance. Au moyen des électroscopes (*fig.* 306 et 307), l'électricité renfermée dans un corps que l'on approche des boules *a* est manifestée par l'écartement des pailles ou des boules; ces effets proviennent, comme nous l'avons déjà expliqué, de la décomposition à distance du fluide électrique naturel de la partie mobile de l'électroscope. Dans l'appareil de Coulomb, l'effet provient encore de la même cause; mais il y a une double décomposition; car en approchant le corps *cd* (*fig.* 308) dont on veut reconnaître l'état électrique, du conducteur *ab*, l'électricité mise en liberté au point *a* par influence, agit à son tour de la même manière sur le disque du clinquant. Ce dernier appareil est évidemment le seul au moyen duquel on puisse mesurer facilement les tensions électriques; car, dans tous les autres, les écarts des boules dépendent et de la tension électrique, et de la pesanteur, de sorte qu'on ne pourrait en déduire les tensions que par des formules compliquées.

507. Au moyen de l'un quelconque de ces appareils, on peut facilement reconnaître l'espèce de l'électricité libre dans un corps. En effet, pour les électroscopes (*fig.* 274 et 276), on commencera par les isoler en les plaçant sur du verre ou de la résine; après quoi, on approchera de leurs supports un corps possédant une électricité connue, par exemple, un bâton de cire d'Espagne frotté. L'électricité résineuse passera dans les boules, et l'électricité vitrée occupera la partie opposée; si alors, avant de retirer le bâton de cire d'Espagne, on touche les supports, l'appareil se trouvera électrisé résineusement, et suivant que le corps dont on veut re-

connaître l'espèce d'électricité, exercera une attraction ou une répulsion, on en conclura la nature de son électricité. En approchant de même un corps possédant une électricité connue des boutons *a* des électroscopes (*fig.* 306 et 307), et touchant ces boutons avant de retirer le corps, on donnera à l'appareil une électricité contraire qui fera écarter les fils, et suivant que cet écart sera augmenté ou diminué par la présence d'un nouveau corps, il possédera une électricité de même nature ou de nature différente que celle du corps qui a servi d'abord. Il est évident qu'il faudrait opérer de la même manière pour l'électroscope de Coulomb.

508. Lorsque dans certains phénomènes il ne se développe que de très-petites quantités d'électricité, les instrumens que nous venons de décrire ne sont souvent point assez sensibles pour qu'on puisse les reconnaître. Volta a imaginé d'accumuler ces petites quantités dans un appareil capable de les retenir, afin d'obtenir des tensions appréciables et dont on puisse reconnaître la nature. L'appareil que nous allons décrire est connu sous le nom d'*Électroscope condensateur*; il est composé (*fig.* 309) d'un électroscope à paille (*fig.* 307), au-dessus duquel se trouve un condensateur dont le plateau inférieur est garni sur sa surface d'une couche de vernis; il est en communication directe avec les pailles, et armé inférieurement d'une tige *m n*, terminée par une boule. On fait communiquer le plateau supérieur avec le sol et on touche la boule *o* avec le corps faiblement électrisé; les charges s'accumulent, et lorsqu'on sépare le plateau supérieur, les pailles divergent plus ou moins par l'électricité accumulée, dont on peut facilement reconnaître la nature par les moyens indiqués plus haut: le plateau inférieur a reçu le nom de Collecteur.

509. *Effets produits par la neutralisation des électricités accumulées.* Lorsque l'on met en communication les deux armures d'une bouteille de Leyde, les animaux placés dans le trajet que font les électricités pour se réunir, éprouvent de vives commotions, et la chaleur qui se dégage peut enflammer l'hydrogène, l'alcool, l'éther, la résine, etc.; mais on obtient des effets beaucoup plus énergiques en réunissant plusieurs bouteilles de Leyde sur un plateau métallique pour faire communiquer les armures extérieures (*fig.* 311), et joignant les armures intérieures par des tringles. Au moyen de ces appareils, qu'on nomme *batteries électriques*, on tue des animaux; on peut brûler des fils de fer, d'or et d'argent, enflammer la poudre, etc. Parmi les expériences que l'on fait ordinairement, une des plus curieuses est la suivante: sur un carton découpé on place une feuille d'or, au-dessous un ruban de soie, et l'on serre le tout entre deux planches; on fait passer à travers l'or une forte décharge: on trouve l'or oxidé et sur le ruban de soie une empreinte violette de la découpure.

510. Les effets que nous venons de décrire sont dus à la faculté conductrice plus ou moins grande des corps à travers lesquels se fait la combinaison des électricités. Lorsque le corps qui établit la communication entre les deux armures est bon conducteur et d'un diamètre suffisant, il n'éprouve aucune variation dans sa température ; mais si ses dimensions étaient très-petites, sa température pourrait s'élever jusqu'au rouge ; c'est ce qui arrive lorsqu'on établit la communication avec des fils de métal très-fins ; et si leur ténuité était très-grande, ils seraient déchirés, brûlés ou volatilisés, l'électricité éclaterait dans l'air et formerait un vide qu'elle traverse facilement, et présenterait des phénomènes analogues à ceux des corps non-conducteurs. Ainsi, d'après cela, la conductibilité est une propriété qui n'a rien d'absolu ; elle dépend de la quantité de fluide à conduire, de sa longueur et des dimensions du corps. Dans les mêmes circonstances, un corps conducteur conduit d'autant mieux qu'il est plus court et plus épais, et pour chaque corps et chaque tension électrique, il existe une dimension et une longueur pour lesquelles le corps cesse en partie d'être conducteur. Ces observations sont parfaitement d'accord avec celles de Coulomb sur les corps isolans et n'en sont que la conséquence nécessaire.

511. Un fait assez remarquable et qui paraît cependant très-naturel, c'est que l'électricité suit de préférence les bons conducteurs ; ainsi on peut impunément décharger une bouteille de Leyde, et même une batterie, au moyen d'un fil de cuivre que l'on met en communication avec les deux armures et que l'on tient à la main, ou avec un fil enveloppé autour du corps, quand toutefois le conducteur a des dimensions suffisantes, car dans le cas contraire une partie de la décharge se ferait à travers les organes. Lorsque l'on établit la communication par plusieurs corps bons ou mauvais conducteurs, mais dont la conductibilité diffère peu, il paraît que le fluide se distribue entre eux proportionnellement à leur conductibilité.

Lorsqu'un conducteur de dimension suffisante établit la communication entre les deux armures d'une bouteille de Leyde, le courant qui le traverse agit pendant la courte durée de son trajet sur les corps voisins, les électrise par influence, et la recomposition rapide du fluide naturel produit souvent de légères commotions ; mais cet effet diminue à mesure que l'épaisseur du conducteur augmente, c'est-à-dire, que la vitesse du fluide devient plus rapide. Ce phénomène est désigné sous le nom de *choc latéral.*

512. *Lumière électrique.* La combinaison des deux électricités et l'explosion de l'une d'elles est toujours accompagnée de lumière. La lumière paraît différer dans les deux fluides, car lorsqu'un conducteur armé d'une pointe est chargé d'électricité vitrée, on aperçoit à l'extrémité de la pointe une belle aigrette, tandis que s'il est chargé d'électricité résineuse, on n'aper-

çoit qu'un point lumineux ; mais il paraît que cette différence provient de ce que le fluide vitré traverse plus facilement l'air que le fluide résineux, du moins c'est ce qui semble résulter de l'expérience suivante : lorsqu'on place une carte entre deux conducteurs terminés par une pointe (*fig.* 311), et qu'on fait passer entre les pointes la décharge d'une bouteille de Leyde, la carte se trouve percée d'un trou très-fin, mais qui n'est point au milieu de l'espace qui sépare les deux pointes ; il est beaucoup plus rapproché de la pointe communiquant avec l'armure chargée d'électricité résineuse. M. Trémery, à qui on doit cette observation, a remarqué qu'à mesure que l'on diminuait la pression de l'air, le trou de la carte se rapprochait du milieu de l'intervalle des deux pointes.

513. L'intensité de la lumière électrique varie avec la pression de l'air, car si on met en communication avec une machine électrique l'appareil (*fig.* 312), on observe qu'à mesure que l'on dilate l'air du vase A B, la lumière électrique à l'extrémité de la pointe *a* va en s'affaiblissant ; mais dans le vide le plus parfait qu'on puisse produire, on remarque encore une lumière sensible. On a expliqué ce phénomène par le choc de l'air qui produirait un dégagement de chaleur et de lumière d'autant plus grand que l'air serait plus dense ; il est facile en effet de démontrer que l'air est fortement ébranlé par les décharges électriques. On emploie pour cela l'appareil suivant, qui a été imaginé par Kinnersley ; il est composé (*fig.* 313) d'un cylindre de verre fermé aux deux extrémités par une virole en cuivre à travers laquelle passe une tige garnie d'un bouton ; la partie inférieure du cylindre reçoit un tube *a b* ouvert par son extrémité supérieure ; l'appareil est plein d'air et renferme une certaine quantité de mercure ; lorsqu'on fait passer une étincelle électrique à travers les deux boules, le mercure du tube *a b* éprouve de vives agitations. La figure 314 présente un appareil plus simple et qui remplit le même but, c'est un tube de thermomètre dont la boule est percée de deux ouvertures dans lesquelles on scelle deux petits conducteurs à boule ; la tige capillaire renferme un index de mercure que l'agitation de l'air met en mouvement.

Le choc de l'air n'est point une explication suffisante des variations d'intensités de lumière, car si la lumière est d'autant plus vive que l'air

est plus dense, comme en même temps la pression de l'air est plus grande, le dégagement de l'électricité n'a lieu que sous une plus grande tension; par conséquent, la lumière croît à mesure que l'explosion a lieu à une plus forte tension, et on pourrait donc regarder la lumière en question comme inhérente à l'électricité, et se développant proportionnellement à la densité de la couche qui fait explosion ; mais il paraît que l'intensité de la lumière électrique dépend à la fois et de la tension sous laquelle elle se dégage et du choc contre l'air, et qu'indépendamment de ces deux causes, la combinaison des fluides produit toujours une certaine quantité de lumière par le seul fait de la combinaison, du moins c'est ce qui paraît résulter de ce que l'électricité dégage de la lumière dans le vide le plus parfait que nous puissions produire, et de plusieurs autres phénomènes que nous décrirons par la suite.

514. Nous terminerons ce qui est relatif à la lumière électrique par la description d'une expérience fort curieuse et qui est fondée sur la rapidité du mouvement de l'électricité. Lorsqu'on place une série de conducteurs à la suite les uns des autres, si l'intervalle qui les sépare est très-petit, en mettant les deux extrêmes en contact avec les deux armures d'une bouteille de Leyde, l'étincelle électrique se manifestera au même instant dans tous les intervalles ; on conçoit d'après cela que si l'on colle sur du verre de petits morceaux d'étain laminé, de manière que les intervalles forment un dessin quelconque, il deviendra lumineux par la décharge d'une bouteille de Leyde.

§ III.

Électricité Atmosphérique.

515. *Identité de l'Électricité et de la Foudre.* Il existe la plus grande analogie entre les effets produits par la décharge des fortes batteries électriques et ceux de la foudre. L'électricité, comme la foudre, est accompagnée d'une vive lumière qui apparaît sous la même forme ; l'électricité produit comme elle la fusion des métaux, l'inflammation des matières

combustibles et la mort des animaux ; et les animaux tués par l'électricité se putrifient en très-peu de temps comme ceux qui ont été foudroyés. Mais ce ne fut qu'en 1752 que Franklin constata l'identité de la foudre et de l'électricité, par les expériences que nous allons rapporter. Il lança contre un nuage orageux un cerf-volant armé d'une pointe et retenu par une ficelle ; d'abord le fil ne donna aucun indice d'électricité, parce qu'il n'était pas assez bon conducteur, mais une légère pluie étant survenue, il devint bon conducteur et Franklin parvint à en tirer des étincelles. Il plaça ensuite sur sa maison une barre de fer isolée, terminée par une pointe, et à sa partie inférieure il adapta un carillon électrique (500) ; le bruit du carillon lui annonça plusieurs fois que la barre était chargée d'électricité. Pendant que cet homme célèbre se livrait, à Philadelphie, à ces recherches importantes, il avait communiqué ses idées aux physiciens d'Europe, en les engageant à faire des essais.

Dalibard, physicien français, fit construire à Marly-Laville, près de Paris, une cabane sur laquelle il plaça une barre de fer terminée supérieurement par une pointe et isolée inférieurement ; après le passage d'un nuage orageux, la barre donnait des étincelles à l'approche d'un corps conducteur. Canton pour obvier au défaut d'isolement de la barre par la pluie qui mouillait le support isolant, le couvrit d'un chapeau ; alors le conducteur conserva l'électricité qu'il avait acquise, et il reconnut que les nuages étaient chargés tantôt d'électricité vitrée, tantôt d'électricité résineuse, et que la pluie et la neige électrisaient aussi la barre.

M. de Romas, en 1759, fit l'expérience du cerf-volant : il entrelaça la corde d'un fil de fer ; il attacha à son extrémité un cordon de soie qui l'isolait parfaitement, et pour se mettre à l'abri d'une décharge trop violente, il tirait les étincelles au moyen d'un excitateur dont une des extrémités communiquait avec le sol, et qui était supporté par des manches de verre de deux pieds de long. L'appareil ayant été dirigé vers un nuage orageux, M. de Romas parvint à tirer des étincelles qui avaient plus de dix pieds de long, et qui faisaient un bruit analogue à des coups de pistolet. On voit, d'après cela, combien la grande conductibilité du cordon rendait importantes les précautions que nous venons de détailler,

et quel danger M. de Romas aurait couru s'il avait reçu de semblables commotions.

516. Il résulte de ce qui précède que les nuages orageux sont électrisés, et qu'ils le sont quelquefois fortement. Il est facile, d'après cela, de concevoir la cause des éclairs et de la foudre. Lorsque deux nuages se rencontrent et qu'ils sont tous deux chargés d'électricité contraire, ou que seulement l'un d'eux est électrisé, l'autre le devient par influence, et s'ils se trouvent à une distance assez petite pour que les électricités puissent les abandonner, l'explosion qui en résulte est accompagnée d'une vive lumière, qui est l'éclair, et le bruit répété par les échos produit le tonnerre. La foudre n'est autre chose que la décharge d'un nuage orageux sur la surface de la terre.

Tous les effets que nous avons décrits (509) sont identiques avec ceux que produit la foudre, et les explications que nous en avons donné (510) sont aussi applicables aux effets de la foudre. Il y a cependant un phénomène particulier produit par la foudre, et dont nous n'avons pas encore parlé ; il consiste en ce que, dans les momens d'orage, des hommes et des animaux sont morts subitement à une grande distance du lieu où s'est faite l'explosion. Ce phénomène s'explique d'une manière très-simple. En effet, soit A B C (*fig.* 315) un nuage chargé d'électricité vitrée ; les points de la surface du sol correspondans aux points A et C seront électrisés résineusement par influence ; si l'explosion a lieu au point A, la partie du sol correspondante au point C rentrera brusquement à l'état naturel par le retour de l'électricité résineuse qui avait été refoulée dans le sol et qui était retenue par l'influence de l'électricité du nuage, et ce retour subit pourra évidemment produire dans les hommes ou les animaux des commotions assez fortes pour les priver de la vie. Ce phénomène a été désigné sous le nom de *choc en retour*.

517. Non-seulement les nuages sont souvent chargés d'électricité, mais l'air atmosphérique l'est aussi, même dans les jours sereins. L'appareil dont on se sert pour reconnaître l'électricité atmosphérique est composé (*fig.* 316) d'un électroscope ordinaire, surmonté d'une tige métallique terminée par une pointe. Il résulte des observations de MM. de Saussure, Gay-Lussac

et Biot, que, quand le ciel est serein, l'électricité est ordinairement vitrée et croît à mesure qu'on s'élève au-dessus de la surface de la terre; aussi on augmente de beaucoup l'indication du thermoscope, en jettant dans l'air une petite boule métallique attachée à un fil dont l'extrémité touche la tige de l'instrument et s'en détache lorsque la boule a parcouru un espace égal à la longueur du fil.

518. *Paratonnerres.* Les paratonnerres sont de grandes verges métalliques placées au sommet des édifices et qui communiquent avec la terre humide ou avec l'eau par des conducteurs de même nature et sans solution de continuité. Lorsqu'un nuage chargé d'électricité passe dans le voisinage, le paratonnerre est électrisé par influence; l'électricité de nature contraire à celle du nuage s'accumule vers la pointe, tandis que l'autre est refoulée dans le sol; la première s'écoule continuellement par la pointe et neutralise sans explosion l'électricité libre du nuage orageux. On peut facilement vérifier le fait que nous venons d'énoncer en plaçant au-dessous ou à côté d'un conducteur isolé et électrisé une pointe communiquant avec le sol.

L'invention des paratonnerres est due au célèbre Franklin; leur utilité a été constatée par une expérience de plus de soixante ans.

Aux États-Unis d'Amérique, où les orages sont plus fréquens et plus redoutables qu'en Europe, l'usage des paratonnerres est devenu populaire. Un grand nombre de bâtimens ont été foudroyés, et on en compte à peine deux qui n'aient pas été mis entièrement à l'abri de la foudre par leurs paratonnerres. Il n'y a pas à craindre non plus que les édifices armés de ces appareils soient par cela même plus exposés à être foudroyés; car l'influence des paratonnerres ne s'exerce qu'à une petite distance : d'ailleurs, la propriété qu'auraient les paratonnerres d'attirer les nuages orageux, supposerait aussi celle de transmettre librement l'électricité au sol, et, par conséquent, il n'en pourrait résulter aucun inconvénient.

519. Nous avons dit que les paratonnerres devaient être terminés par des pointes aiguës : cette condition est importante pour que l'influence s'étende à la plus grande distance possible et que le nuage soit neutralisé avant de se trouver à la distance explosive; si la tige était arrondie, elle n'en préserverait pas moins l'édifice; seulement il pourrait y avoir explosion sur le sommet de la tige, mais le fluide n'en suivrait pas moins le conducteur de préférence aux substances beaucoup moins conductrices qui constituent l'édifice. D'après le docteur Rittenhousse, les pointes d'un grand

nombre de paratonnerres de Philadelphie ont été émoussées par la fusion, et on n'a point observé que les bâtimens auxquels ils appartiennent aient été frappés de la foudre depuis l'arrondissement de ces pointes.

520. Tous les corps qui s'élèvent au-dessus de la surface de la terre, tels que les montagnes, les clochers, les arbres, sont ceux sur lesquels la foudre tombe le plus fréquemment, parce qu'ils sont plus rapprochés des nuages orageux; les arbres et les églises dont les clochers sont élevés et ne sont point armés de paratonnerres, sont donc des abris dangereux dans les temps d'orage, et ces derniers lieux surtout, à cause du préjugé si généralement répandu de sonner les cloches, car un grand nombre d'expériences concourent à prouver que la foudre tombe plus fréquemment sur les clochers où l'on sonne que sur ceux où l'on ne sonne pas : en 1718, M. Deslande fit savoir à l'Académie que, dans la nuit du 14 au 15 avril, la foudre était tombée en Bretagne sur vingt-quatre églises, que ces églises étaient précisément celles où l'on sonnait, et que la foudre avait épargné celles où l'on ne sonnait pas.

521. Il nous reste maintenant à examiner les détails de construction nécessaires pour que les paratonnerres remplissent exactement l'objet auquel ils sont destinés: 1° La pointe qui termine la tige doit être très-aiguë, afin qu'elle agisse sous la plus petite influence possible et par conséquent à la plus grande distance possible du nuage, et de plus il est indispensable qu'elle ne puisse s'oxider par le contact de l'air ni se fondre facilement par des décharges électriques, car si la pointe s'arrondissait, ou par l'oxidation ou par la fusion, elle attirerait le nuage et provoquerait les explosions que l'on veut éviter, mais qui cependant seraient sans danger (519); la pointe doit donc être formée d'un métal difficile à fondre et non oxidable à l'air. On emploie ordinairement le platine; on termine la tige de fer par une tige de cuivre d'environ $0^m,50$, à l'extrémité de laquelle on soude à l'argent une aiguille de platine de $0^m,05$ de longueur. 2° La tige doit être assez élevée pour protéger tout l'édifice; d'après les observations de Charles, qui s'était beaucoup occupé de cet objet, il paraît qu'une tige aiguë protège contre la foudre un espace circulaire dont le rayon est double de sa hauteur : il faudra donc donner à la tige une hauteur égale au quart du diamètre de l'édifice qu'elle doit protéger. Si l'édifice avait de trop grandes dimensions, on placerait plusieurs paratonnerres; leur distance devrait être quatre fois plus grande que leur hauteur; les longueurs des tiges de paratonnerres le plus souvent employées sont de 7 à 9 mètres. 3° La partie inférieure de la tige devrait être isolée de l'édifice et n'être en communication qu'avec le conducteur, mais cet isolément serait très-difficile à exécuter et à maintenir; heureusement il n'est point indispensable, car l'électricité suit toujours de préférence les bons conducteurs : ainsi on pourra fixer la partie inférieure de la tige à une des pièces de charpente de la toiture. 4° Le conducteur qui fait communiquer la tige avec le sol doit y arriver par le plus court chemin,

n'avoir aucune solution de continnité et se prolonger jusque dans un puits ou daus un lieu humide, afin que la communication soit plus immédiate; si le terrain était sec, il faudrait faire descendre le conducteur de 4 ou 5 mètres dans la terre et l'environner de charbon; le charbon préserverait le fer de la rouille, et étant bon conducteur favoriserait la communication, il faudrait diriger de ce côté les eaux pluviales: dans tous les cas, il faut que l'extrémité qui plonge dans la terre ou dans l'eau se divise en plusieurs branches, afin que la commnnicatiou avec le sol soit la plus grande possible, car c'est là que réside la principale cause de l'efficacité de l'appareil. 5° Le conducteur n'a pas besoin d'être isolé, par la raison que nous avons donnée plus haut; on lui fait suivre les murs de l'édifice en le sontenant par des tringles scellées dans les murailles et sur les toits. 6° La tige et les conducteurs doivent avoir des dimensions suffisantes pour que de fortes décharges ne puissent pas les fondre; on a reconnu par expérience, qu'il suffisait de donner à la partie inférieure de la tige un diamètre de $0^m,05$, et aux conducteurs $0^m,025$. 7° La difficulté de former le conducteur avec des barres de fer, a fait imaginer de les remplacer par des cordes en fil de fer; celles de 15 à 16 millimètres de diamètre paraissent suffisantes dans tous les cas. 8° Pour éviter l'oxidation du métal, on convre ordinairement les conducteurs d'one couche de vernis. 9° Lorsqne l'édifice renferme des pièces métalliques nn peu considérables, telles que des gouttières ou des lames de plomb, il faut les faire communiquer avec le conducteur. 10° Lorsqu'on place plusieurs paratonnerres sur nn édifice, on établit un conducteur pour chaque paire de tiges. 11° Qoelquefois on place snr les bâtimens isolés des tiges horizontales, communiquant avec le conducteur; elles servent à préserver l'édifice des lambeaux de nuages orageux que les vents pourraient jeter sur ses faces. La figure 317 représente la tige d'un paratonnerre, et la figure 318 la disposition de la tige et des conducteurs sur un édifice. Une grande partie de ce qui précède a été extrait du rapport fait à l'Académie par M. Gay-Lussac, au nom d'une Commission chargée de rédiger une instruction sur les paratonnerres. (Voyez, pour plus de détails, les Annales de Physique et de Chimie, tom. XXVI).

522. Parmi les phénomènes qui accompagnent les orages, il en est un dont nous n'avous point encore parlé, et qui produit souvent de terribles effets : c'est la grêle.

523. Ces globules de glace se forment dans les nuages orageux, et l'électricité paraît jouer un grand rôle dans leur formation. On avait snpposé que la grêle devait son origine à de l'eau de pluie dont les gouttes s'étaient congelées à nne grande hauteur, et qui dans leur chute rencontraient de nouvelles gouttes liquides dont les molécules congelées s'arrangeaient autour d'elles par des couches concentriques et augmentaient leur volume; mais comme la grêle ne se forme souvent qu'à nne petite hauteur, on ne peut pas admettre que dans le petit espace qu'elle parcourt, elle pnisse acquérir un poids qui va souvent jusqu'à plus de 50 grammes. Volta a expliqué l'accroissement de volume de la

grêle de la manière suivante : il suppose deux nuages chargés d'électricités contraires, voisins l'un de l'autre et dont le plus élevé est formé de petits grains de grêle, provenant de la congélation subite de la vapeur qu'il renfermait ; la grêle tendra à tomber en vertu de son poids et sera repoussée par le nuage inférieur aussitôt qu'elle en aura partagé l'électricité ; le nuage supérieur l'attirera et la repoussera de la même manière, et dans ce trajet réitéré d'un nuage à l'autre, les grains de grêle rencontrant de la vapeur aqueuse, la condensent à leur surface et augmentent de volume par des couches concentriques, jusqu'à ce que l'action de la pesanteur les fasse tomber. Un fait qui vient à l'appui de cette explication, consiste en ce que la chute de la grêle est ordinairement précédée par un bruit semblable à celui que produirait le choc de corps durs agités par des mouvemens rapides. Quoi qu'il en soit, il est hors de doute que la formation de la grêle est due à des phénomènes électriques ; aussi dans plusieurs circonstances les paratonnerres paraissent l'empêcher en neutralisant l'électricité des nuages ; mais ces appareils n'auront quelque efficacité qu'autant que les pointes qui les terminent pourront agir sur les nuages orageux. Dans les vallées fermées par des montagnes élevées et voisines, et qui seraient hérissées de paratonnerres, il est très-probable que l'on parviendrait à empêcher la formation de la grêle, parce que ces instrumens exerceraient leur influence à des hauteurs suffisantes ; mais dans les grandes plaines il paraît difficile d'élever des paratonnerres de manière à pouvoir conjurer l'orage. Il y a entre la foudre et la grêle cette grande différence : la foudre n'éclate que lorsque l'objet sur lequel elle doit se porter est déterminé ; la grêle, au contraire, se forme indépendamment des corps sur lesquels elle doit tomber. On conçoit d'après cela que les paratonnerres préservent constamment, et dans toutes les circonstances, des effets de la foudre, et qu'ils ne peuvent empêcher la formation de la grêle qu'autant que les nuages orageux sont dans leur sphère d'activité ; ce qui ne peut avoir lieu que dans certaines circonstances.

§ III.

Différentes causes de développement de l'Électricité.

524. Jusqu'ici nous n'avons examiné le développement de l'électricité que dans deux circonstances, le frottement et l'influence à distance d'un corps déjà électrisé ; mais la présence de l'électricité se manifeste encore,

1° Par la pression.

2° Par la chaleur.

3° Par le simple contact des corps hétérogènes. L'ensemble des phénomènes que produit le dégagement d'électricité par le contact a reçu le nom de *Galvanisme*.

4° Par les actions chimiques.

5° Certains corps naturels possèdent un état électrique permanent qui ne diminue ni dans le vide, ni par le contact de l'air et des corps bons conducteurs, mais qui n'agit constamment par influence que sur certains corps, et sur tous ceux qui sont conducteurs, dans quelques circonstances particulières. L'ensemble de ces phénomènes a reçu le nom de *Magnétisme*.

6° Enfin, il existe des poissons qui sont pourvus d'un organe au moyen duquel ils développent une grande quantité d'électricité.

525. L'électricité qui se manifeste dans ces différentes circonstances paraît être de même nature que celle qui provient du frottement ; cependant elle donne lieu à un grand nombre de phénomènes nouveaux ; nous n'examinerons ici que l'électricité développée par la pression, par la chaleur, par certains animaux, et dans les deux chapitres suivans nous examinerons le magnétisme et l'électricité développée par le contact et les actions chimiques.

526. *Développement de l'Électricité par la pression.* La première expérience qui conduisit à reconnaître dans la pression une cause de développement d'électricité, est due à M. Libes. Ce physicien découvrit qu'en pressant un disque métallique isolé contre du taffetas gommé, celui-ci prend l'électricité vitrée et le disque métallique l'électricité résineuse ; par la pression avec frottement, le taffetas prend au contraire l'électricité résineuse. Hauy constata ensuite que le spath d'Islande et quelques autres substances minérales jouissaient de la propriété d'être électrisées par la pression entre les doigts. M. Becquerel, qui depuis s'est occupé d'une manière spéciale de ces phénomènes, est parvenu à des faits généraux qui sont d'une grande importance et que nous allons décrire sommairement.

527. Quand deux corps de nature quelconque dont l'un est élastique, étant isolés, sont pressés l'un contre l'autre, ils se constituent dans deux états électriques diffé-

rens, mais ils ne sortent de la compression avec de l'électricité libre, qu'autant que l'un des deux n'est pas un bon conducteur. Il paraît que l'intensité de l'état électrique après la séparation, dépend de la conductibilité des deux corps et de la vitesse de séparation; car, pendant la durée de la pression, les deux couches électriques séparées étant en équilibre, comme M. Becquerel s'en est assuré, l'équilibre ne subsiste que par le seul fait de la pression; si on la diminue lentement, les électricités qui ont été séparées se combineront de nouveau avec d'autant plus de facilité que la séparation sera plus lente et que les fluides se mouvront plus aisément dans les corps; aussi on obtient toujours une tension électrique d'autant plus grande que la séparation a été plus rapide. Lorsqu'on presse l'un contre l'autre deux corps non isolés dont l'un est élastique, si l'un d'eux est mauvais conducteur, il sera électrisé après la séparation; c'est ce qu'il était d'ailleurs facile de prévoir. Les corps électrisés par pression conservent l'électricité un temps plus ou moins long; il paraît que cette propriété est liée avec la faculté conductrice, et que la durée de la conservation croît à mesure que la faculté conductrice diminue. La chaleur a une grande influence sur le développement de l'électricité par la pression; le spath d'Islande, qui par la pression prend l'électricité vitrée, acquiert l'électricité résineuse lorsque sa température a été suffisamment élevée; deux corps de même nature, tels que deux morceaux de liége, de spath d'Islande, pressés, s'électrisent rarement; mais lorsque l'un d'eux est échauffé, ils se trouvent tous deux, après la séparation, dans deux états électriques opposés; si la pression dure jusqu'à ce que l'équilibre de température ait eu lieu, les corps séparés ne sont plus électrisés. L'eau hygrométrique qui recouvre la surface des corps, empêche souvent l'électricité de rester après la séparation, probablement parce qu'elle les rend bons conducteurs; aussi il faut avoir soin de sécher et d'essuyer les corps avant de les soumettre à l'expérience. M. Becquerel, au moyen d'un appareil très-ingénieux, a découvert que l'électricité développée par la pression, dans le cas où la vitesse de séparation donnait le maximum d'électricité, était proportionnelle à la pression. Cependant il est probable que cette loi ne serait point exacte pour de très-grandes pressions; car il semble résulter de ces phénomènes que la séparation des électricités dépend du rapprochement des molécules, et par conséquent l'accroissement d'électricité devra devenir moindre à mesure que molécules déjà très-rapprochées, ne le seront davantage que plus difficilement.

Les corps élastiques dont M. Becquerel s'est principalement servi sont des plaques de liége, de caoutchouc, d'amadou, d'écorce d'orange, de moelle de sureau, isolées par des manches de gomme.

Plusieurs phénomènes paraissent avoir beaucoup d'analogie avec ceux que nous venons de décrire. Lorsqu'on sépare dans l'obscurité deux lames de mica, il y a dégagement de lumière. Si, avant la séparation, on fixe les lames à deux manches

isolans, on trouve les lames électrisées en sens contraire. La chaux sulfatée présente le même phénomène; mais, poor l'observer, il faut la priver de son eau hygrométrique et élever la température; une carte dédoublée donne des résultats analogues. Cependant le développement de l'électricité par exfoliation ne paraît convenir, à quelques exceptions près, qu'aux substances régulièrement cristallisées; car les fragmens d'un bâton de verre ou de résine ne possèdent aucune électricité. Le choc produisant une compression subite, il doit nécessairement se développer de l'électricité; il est probable qoe la lumière qui l'accompagne quelquefois provient de la combinaison rapide des électricités qui ont été séparées par la pression.

528. *Électricité développée par la chaleur.* La chaleur, comme nous l'avons vu, a une grande influence sur l'électricité développée par la pression; elle en a une très-grande aussi sur la nature de celle qui est produite par le frottement; car plus on élève la température d'un corps, plus il tend, par son frottement avec un autre corps non-conducteur, à prendre l'électricité résineuse; mais la chaleur agit souvent sans le secours du frottement ou de la pression pour développer dans un corps de l'électricité libre: tels sont les cristaux de tourmaline et de magnésie boratée, chauffés à la flamme d'une bougie; les deux espèces d'électricité, mises en liberté, se réunissent principalement en deux points opposés qui acquièrent des tensions égales, mais de nature contraire, et qoi prennent le nom de *Pôles.* On peut facilement vérifier ce fait sur la tourmaline; en la chauffant et présentant successivement ses deux extrémités à un petit pendule, il est attiré par tous deux; mais si on communique de l'électricité au pendule, il est attiré par une des extrémités de la tourmaline, et repoussé par l'autre. On peut encore vérifier ce dernier fait au moyen de l'appareil (*fig* 319), qui est composé d'une plaque horizontale lestée par les boules *a* et *b*, et garnie à son centre d'une chappe qui repose sor une pointe aiguë. On place sur la plaque une tourmaline échauffée, et on présente successivement à ses deux extrémités une autre tourmaline également échauffée; un des pôles de la tourmaline est attiré, l'autre est repoussé; à mesure que la tourmaline se refroidit, la tension électrique diminue; refroidie à — 20°, les pôles reparaissent, mais en sens contraire. Lorsqu'une tourmaline électrique est brisée en deux ou en plus grand nombre de fragmens, chacun d'enx possède deux pôles contraires. Les tonrmalines électrisées se comportent absolument comme les piles électriques dont nous avons parlé (506). Tous les cristaux électriques par la chaleur présentent une circonstance bien singulière; ils dérogent à la loi de symétrie (pag. 80).

529. *Poissons électriques.* Plusieurs poissons ont la propriété de produire des effets analogues à ceux qui résultent des décharges électriques; on en connaît aujourd'hui sept espèces. M. de Humboldt, pendant son séjour en Amérique, a fait beaucoup d'expériences sur une espèce de ces poissons nommée *gymnote.* Ces animaux ne sont

électriques que quand ils le veulent, et principalement quand ils sont irrités. La commotion est produite par le contact, elle est très-violente. M. de Humboldt dit n'avoir jamais éprouvé, par la décharge d'une bouteille de Leyde, une commotion plus terrible que celle qu'il reçut d'une gymnote sur lequel il avait placé les deux pieds. Tous les corps mauvais conducteurs arrêtent la communication, et tous les corps bons conducteurs la propagent. Une personne étant isolée (d'après l'observation de M. Gay-Lussac), il faut que le contact soit bien immédiat pour qu'elle éprouve une commotion; l'électromètre le plus sensible n'est point affecté par la décharge d'une gymnote; dans l'obscurité elle ne produit point de lumière. On connaît fort peu la disposition de l'organe qui, chez ces animaux, développe cette faculté électrique; on sait encore moins de quelle manière elle y est produite; ces décharges paraissent avoir plus d'analogie avec celles des piles voltaïques, dont nous parlerons plus tard, qu'avec celles des batteries électriques.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE II.

Électricité.

Phénomènes généraux.

L'ambre, la cire d'Espagne, le verre et un grand nombre d'autres corps frottés avec une étoffe de laine, acquièrent la faculté d'attirer les corps légers à distance et malgré l'interposition d'un corps quelconque; les corps qui jouissent de cette propriété sont dits électrisés. Lorsque le corps frotté a une grande dimension, l'approche d'un corps en fait jaillir des étincelles, et il acquiert une odeur phosphorique prononcée. On a admis que ces phénomènes étaient produits par un fluide particulier développé par le frottement.

Les corps conduisent très-inégalement l'électricité: le verre, les résines, le soufre, la soie, les gaz secs sont mauvais conducteurs; les liquides, les gaz humides, les plantes, les animaux et les métaux sont bons conducteurs. Un corps est isolé lorsqu'il est soutenu par un corps mauvais conducteur.

Lorsqu'on frotte deux corps isolés, tous deux deviennent électriques.

L'électricité qui se développe par le frottement dans deux corps isolés est de nature différente dans chacun d'eux. Les corps chargés d'électricité de même nature se repoussent, et ceux qui sont chargés d'électricité de nature différente s'attirent; celle qui se développe dans le verre frotté avec de la laine porte le nom d'électricité vitrée; celle qui provient de la résine dans les mêmes circonstances est désignée sous le nom d'électricité résineuse; la première porte aussi le nom d'électricité positive et la dernière celui d'électricité négative.

Pour expliquer ces faits, on a admis que tous les corps renfermaient deux fluides électriques, dont les molécules repoussaient les molécules similaires et attiraient celles de nature différente. Dans les corps non électrisés les fluides se neutralisent mutuellement.

Les attractions et les répulsions électriques varient en raison inverse du carré de la distance, et l'intensité de la force est proportionnelle aux quantités de l'électricité libre.

Lorsqu'un corps isolé est chargé d'électricité, elle se dissipe 1° par l'humidité qui se dépose sur le corps isolant et le rend conducteur; 2° par le contact de l'air; 3° par l'imparfaite conductibilité des conducteurs. La perte par l'air à chaque instant est proportionnelle à la tension élec-

trique, elle augmente avec l'état hygrométrique de l'air; pour un même état de l'air, sa perte est indépendante de la grandeur, de la forme et de la nature des corps. La faculté conductrice des corps isolans croît avec la tension et décroît avec leur longueur. Les longueurs auxquelles un même corps non conducteur, de forme cylindrique, commence à isoler complètement, sont proportionnelles aux carrés des tensions électriques.

L'électricité libre est retenue dans les corps par la pression de l'air.

L'électricité libre d'un corps est réunie à sa surface et y forme une couche infiniment mince dont l'épaisseur varie en général d'un point à un autre. Dans la sphère, la couche est partout d'égale épaisseur; dans un ellipsoïde, les épaisseurs aux extrémités des axes sont proportionnelles aux longueurs des axes. A l'extrémité d'un cône, l'épaisseur est infinie. La pression exercée sur l'air est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche.

Lorsqu'un corps isolé et à l'état naturel est voisin d'un corps électrisé, l'électricité naturelle du premier est décomposée par influence; l'électricité de même nature que celle du dernier est refoulée dans la partie du corps la plus éloignée, tandis que l'électricité de nature différente est attirée dans la partie la plus voisine.

Les attractions et les répulsions apparentes des corps électrisés sont le résultat des attractions et des répulsions des couches électriques qui existent ou se développent à leur surface par influence; les corps participent à ces mouvemens, parce que les couches électriques sont maintenues à leur surface, ou par adhérence, s'ils sont mauvais conducteurs, ou par la seule pression de l'air, s'ils sont bons conducteurs.

Lorsque deux corps électrisés de manière différente sont très-voisins, et que la tension de leurs couches électriques est plus grande que la résistance de l'air, les fluides électriques les abandonnent et se portent l'un sur l'autre en dégageant de la chaleur et de la lumière.

Appareils Électriques.

Machines électriques. Ces appareils sont composés d'un plateau de verre circulaire mobile autour de son centre, qui, par un mouvement de rotation, frotte contre des coussins communiquant avec le sol, et d'un conducteur isolé, terminé d'un côté par des pointes voisines du plateau; par le frottement le plateau s'électrise vitreusement, et le conducteur, électrisé par influence, laisse dégager par ses pointes le fluide résineux, et se charge d'électricité vitrée. — Appareil de rotation continue. — Carillon électrique.

Électrophore. Cet appareil est composé d'un plateau de résine et d'un disque métallique garni d'un manche de verre. En frottant le gâteau avec une peau de chat, il s'électrise résineusement; en plaçant dessus le disque métallique, ce dernier est électrisé par influence; en touchant sa surface supérieure et la soulevant, il renferme l'électricité libre qui était retenue sur sa surface inférieure avant la séparation.

Condensateurs. Ces appareils sont composés de deux plateaux métalliques séparés par une lame d'une matière isolente; le plateau inférieur est isolé, et le plateau supérieur est garni d'un manche de verre. Lorsqu'on fait communiquer le premier avec le sol, et le dernier avec une machine électrique en activité, l'électricité dont se charge le plateau inférieur agit par influence sur l'électricité naturelle du plateau supérieur, et comme il communique avec le sol, il ne se charge que de l'électricité contraire à celle du premier; et cette électricité est entièrement dissimulée par celle du plateau supérieur; mais elle en neutralise une certaine quantité dans le plateau inférieur, de sorte que quand la charge est arrivée au maximum, le plateau inférieur renferme une quantité d'électricité libre égale à celle qu'il aurait prise par la seule communication avec la machine, et une quantité d'électricité dissimulée d'autant plus grande que la lame isolante est plus mince: le plateau supérieur ne renferme que de l'électricité dissimulée. Lorsque l'appareil est chargé, on peut le décharger au moyen d'un excitateur: cette décharge a lieu avec explosion; lorsqu'on l'isole, on peut la décharger en touchant successivement les deux armures.

La bouteille de Leyde est un véritable condensateur.

Piles électriques. Si après avoir superposé une série de petites plaques de verre garnies sur chaque face de lames métalliques, on met la première armure en contact avec le conducteur d'une machine électrique, et la dernière en communication avec le sol, les deux armures de chaque lame de verre se chargeront d'électricité dans le même ordre; au commencement, l'électricité de toutes les armures intérieures sera dissimulée; mais, par le contact de l'air, l'appareil étant isolé, il acquerra des tensions qui iront en croissant depuis le centre jusqu'aux extrémités, et

qui seront de nature contraire dans les deux moitiés de l'appareil; si on partage la pile en plusieurs parties, dans chacune l'électricité se distribuera comme dans la pile totale.

Électroscopes. Ils sont tous fondés sur les attractions et les répulsions qui se manifestent dans les corps électrisés; le meilleur de tous est celui de Coulomb, qui repose sur les mêmes principes que la balance électrique. En appliquant à ces appareils un condensateur; et en y accumulant de très-petites charges, on peut obtenir des tensions très-sensibles, quoique les charges individuelles soient trop faibles pour être appréciables.

Effets produits par les explosions électriques. Tous les effets des explosions électriques dépendent des quantités d'électricités qui se portent l'une sur l'autre, de la faculté conductrice du corps qui établit la communication, et de ses dimensions. Si le corps est bon conducteur et de dimensions suffisantes, il n'éprouve aucun changement; mais si ses dimensions sont trop petites pour les quantités d'électricités qui doivent le traverser, il s'échauffe, souvent est dispersé, et l'électricité traverse facilement le vide qu'elle s'est formé; c'est ainsi que l'électricité agit sur des fils métalliques très-fins.

Lumière électrique. La lumière électrique paraît dépendre de la tension sous laquelle se fait l'explosion et de la densité de l'air; mais il paraît qu'indépendamment de ces causes, il se dégage de la chaleur et de la lumière par le seul fait de la combinaison des deux fluides.

Électricité Atmosphérique.

Les effets de la foudre sont identiques avec ceux produits par les explosions électriques. Les nuages sont de grands conducteurs mobiles chargés d'électricité; lorsque l'électricité passe d'un nuage dans un autre, la lumière de l'explosion porte le nom d'éclair; lorsque l'explosion a lieu sur la terre, c'est le tonnerre; lorsqu'un nuage a ses deux extrémités voisines de la surface de la terre, les points correspondans de la terre sont électrisés par influence, et si l'explosion a lieu sur l'un deux, la rentrée subite de l'électricité dans l'autre peut produire des commotions assez fortes pour tuer des hommes et des animaux : c'est ce qu'on appelle choc en retour.

L'air atmosphérique est aussi chargé d'électricité, même lorsque le ciel est serein. Il paraît que dans ce cas son électricité est vitrée et croît à mesure qu'il est plus élevé au-dessus de la surface de la terre.

Les paratonnerres sont de grandes verges métalliques placées au sommet des édifices et qui communiquent avec l'eau ou la terre humide. Lorsqu'un nuage orageux est dans le voisinage du paratonnerre, l'appareil est électrisé par influence, sa pointe rayonne sur le nuage de l'électricité contraire, le neutralise en totalité ou en partie, et dans le cas où l'explosion aurait lieu, elle se ferait sur le paratonnerre, et l'édifice ne serait point compromis, parce que l'électricité suit toujours de préférence les bons conducteurs.

Différentes causes du Développement de l'Électricité.

L'électricité se développe, 1° par le frottement, 2° par l'influence à distance des corps électrisés, 3° par la pression, 4° par la chaleur, 5° par le contact des corps hétérogènes, 6° dans les actions chimiques. Certains corps, tels que les aimans, possèdent un état électrique permanent; enfin, certains poissons sont doués d'un organe particulier qui développe de l'électricité.

L'électricité des aimans, celle qui est produite par le contact et les actions chimiques, seront examinées dans les deux Chapitres suivans.

Électricité par la pression. Lorsque l'on presse l'un contre l'autre deux corps isolés, tous deux se chargent d'électricité; la quantité d'électricité libre après la séparation est d'autant plus grande que la pression a été plus forte, la vitesse de séparation plus grande, et que l'un deux est plus mauvais conducteur. La lumière qui se dégage dans le choc paraît provenir de la combinaison rapide des électricités qui avaient été séparées par la pression.

Électricité provenant de la chaleur. Plusieurs cristaux naturels, comme la tourmaline et la magnésie boratée, acquièrent par la chaleur deux pôles électriques contraires. Si lorsqu'ils sont électrisés, on les divise en plusieurs parties, les deux pôles électriques se manifestent dans chacune d'elles. Ces cristaux se comportent comme les piles électriques. On a remarqué que tous ces cristaux dérogeaient à la loi de symétrie.

Poissons électriques. On connaît aujourd'hui sept espèces de poissons électriques : ces animaux produisent à volonté, quand on les touche, de violentes commotions, qui ont cependant plus d'analogie avec les piles voltaïques dont nous parlerons plus tard, qu'avec les explosions des batteries électriques. On ne connaît point les circonstances du développement de l'électricité dans ces animaux.

CHAPITRE III.

Magnétisme.

§ I[er].

Phénomènes Généraux.

530. La plupart des mines de fer dans lesquelles ce métal n'est pas au maximum d'oxidation, jouissent de la propriété d'attirer le fer, le nickel et le cobalt. On les désigne sous le nom d'Aimans Naturels.

531. Lorsqu'on plonge un aimant dans de la limaille de fer, elle s'y attache; lorsqu'on la présente à une certaine distance, elle s'élance sur lui : l'attraction se manifeste également malgré l'interposition d'un corps quelconque, dans le vide comme dans l'air, lorsque l'aimant est isolé, comme quand il communique avec un autre corps.

532. *Pôles.* En observant un aimant après qu'il a été roulé dans la limaille de fer, on trouve que ce métal ne s'est pas fixé uniformément sur sa surface, et qu'il s'est plus particulièrement ramassé autour des deux points opposés, où la vertu magnétique paraît principalement résider, et qu'on a désignés sous le nom de pôles (*fig.* 320). Si l'on suspend un aimant naturel par un fil, de manière que la ligne qui passe par les pôles soit horizontale (*fig.* 321), on remarque que l'aimant étant libre, la ligne des pôles se dirige sensiblement parallèlement au méridien; si on le dérange de cette position, il y revient, en faisant des oscillations plus ou moins nombreuses. Lorsqu'on approche deux aimans suspendus comme nous venons de le dire, on observe qu'un même pôle de l'un d'eux attire un des pôles du second aimant et repousse l'autre; que les pôles qui se repoussent, sont ceux qui se dirigent naturellement tous deux ou vers le nord ou vers le sud, et que ceux qui s'attirent sont au contraire ceux qui dans chaque aimant isolé se tournent vers des points opposés de l'espace. Il résulte de là, que dans les aimans les pôles de même nature se repoussent, et que ceux de nature différente s'attirent. On peut expliquer la tendance de la ligne des pôles d'un aimant à se diriger parallèlement au méridien, en regardant la terre comme un aimant dont les pôles magnétiques coïncident sensiblement avec ses pôles de rotation. Le pôle boréal d'un aimant sera alors celui qui se tourne vers le sud, et son pôle austral sera dirigé vers le nord.

533. *Communication de la Vertu Magnétique.* Lorsqu'on plonge un aimant dans de la limaille de fer, les parcelles de fer qu'il entraîne sont placées les unes à

la suite des autres. Ce fait ne peut s'expliquer qu'en admettant que chaque parcelle de fer devient magnétiqne par son contact direct avec l'aimant ou avec la parcelle métallique qui la précède ; c'est d'ailleurs ce que l'on peut vérifier en suspendant à un aimant un petit fil de fer doux : son extrémité libre aura un pôle de même nature que celui de l'aimant, auquel l'autre extrémité est fixée, et pourra sontenir un second fil de fer qui présentera les mêmes phénomènes ; mais chacun de ces fils ne reste magnétique qu'autant qu'il est fixé à l'aimant ; aussitôt qu'il en est détaché, il cesse d'attirer le fer.

534. Un aimant naturel agit aussi sur l'acier trempé, ou sur le fer uni avec une petite quantité de phosphore, d'arsenic ou d'étain ; ces corps acquièrent plus difficilement la faculté magnétique, mais ils la conservent ; le nickel et le cobalt sont dans le même cas que le fer ; cependant, à l'état de pureté, ils conservent la vertu magnétique : mais cette faculté est augmentée par le mélange des substances étrangères et par la trempe. On appelle *Aimans Artificiels* des barreaux d'acier trempé, auxquels on a communiqué la vertu magnétique par des aimans natnrels ou par d'autres aimans artificiels. Les aimans perdent tous leur faculté magnétique à la chaleur rouge. D'après les observations de M. Barlow, une barre de fer doux placée dans la direction de l'axe magnétique terrestre, agit sur l'aiguille aimantée jusqu'à la chaleur rouge obscure ; à la chaleur blanche, son influence est nulle. Il paraît, d'après les expériences de Coulomb, que tous les autres métaux sont attirés par les aimans ; mais comme ces attractions sont excessivement faibles, il faut des appareils d'une extrême sensibilité pour les constater, et on doute si les effets observés ne sont pas dus à une petite quantité de fer que renfermeraient ces métaux.

535. Les aimans artificiels se prêtant à toutes les formes possibles, on peut s'en servir pour observer avec précision les phénomènes que nous avons reconnus dans les aimans naturels.

536. *Déclinaison.* Lorsqu'on suspend une aiguille aimantée sur une pointe ou par un fil (*fig.* 322, 323), on remarque qu'elle ne coïncide pas avec le méridien ; l'angle formé par la direction de l'aiguille avec celle du méridien, porte le nom de Déclinaison ; cet angle varie en grandeur et en direction suivant les lieux, et dans le même lieu, avec le temps.

537. *Inclinaison.* Lorsqu'on suspend nne aiguille non aimantée par un axe horizontal passant par son centre de gravité (*fig.* 324), elle reste en équilibre dans toutes les positions possibles ; mais si, après l'avoir aimantée, on la dirige dans le méridien magnétique, l'aiguille prend une position dans laquelle elle est en équilibre stable. L'angle formé par la direction de l'aiguille avec la ligne horizontale, porte le nom d'Inclinaison.

538. *Lois des Attractions et des Répulsions Magnétiques.* Les attractions et les

répulsions magnétiques suivent exactement la raison inverse des carrés des distances. On doit à Coulomb la découverte de ce fait important ; c'est au moyen de la balance électrique (470) qu'il parvint à la mettre en évidence : Coulomb plaça à l'extrémité du fil de suspension (*fig.* 325) un étrier dans lequel il introduisit d'abord une tige non magnétique, pour mettre la ligne de repos, le zéro de la division du micromètre et celui de la cage dans le méridien magnétique ; après quoi il remplaça la tige non magnétique par une aiguille aimantée ; il fixa à l'extrémité de l'aiguille aimantée un barreau aimanté vertical, de manière que les pôles de même nature fussent voisins ; l'aiguille horizontale fut repoussée, et il put comme dans l'expérience (472), en faisant mouvoir l'aiguille du micromètre en sens contraire de la répulsion, rapprocher les aimans à différentes distances, et en déduire pour chacune d'elles l'intensité de la répulsion. Mais ici la force répulsive des deux aimans ne fait pas seulement équilibre à la force de torsion, elle contrebalance encore la force directrice de la terre, qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique. Ainsi, dans chaque position d'équilibre, il faudra ajouter à l'angle de torsion, la force directrice de la terre. Coulomb, par des expériences préliminaires, avait découvert que cette force est proportionnelle à l'angle formé par l'aiguille avec la direction du méridien magnétique : il suffisait donc, dans chaque cas particulier, de déterminer la force de torsion qui maintenait l'aiguille à une déclinaison de 1°. Dans une série d'observations, l'aiguille mobile avait 15 pouces de long, 1 ligne ½ de diamètre; la force directrice pour 1°, était de 35° de torsion, et les distances des deux aimans étaient de 24°, 17°, 12°, pour les torsions micrométriques de 0°, 3 cercles et 8 cercles. Les forces directrices étaient donc dans ces trois expériences de $24 \times 35 = 840$, de $17 \times 35 = 595$, et de $12 \times 35 = 420$, et les torsions étaient 24°, $17 + 3 \times 360 = 1097$, et $12 + 360 \times 8 = 2892$; et par conséquent, les forces qui faisaient équilibre aux répulsions, étaient $24 + 840$, $595 + 1097$, et $420 + 2892$, ou 864, 1692, 3312; or ces nombres sont sensiblement dans le rapport inverse des carrés des nombres 24, 17, 12 qui mesurent les distances des pôles des aimans ; car, pour de petits angles, on peut prendre les arcs pour les cordes. On pourrait déterminer la loi des attractions magnétiques de la même manière, en employant la même disposition que pour les attractions électriques (473). Dans ces expériences, on doit toujours choisir des aimans très-longs, afin de pouvoir négliger l'action des autres pôles, et on doit les prendre en acier fortement trempé, pour que l'action mutuelle des aimans ne puisse développer de nouveau magnétisme dans aucun d'eux.

539. ***Distribution du Magnétisme dans un barreau aimanté.*** Lorsqu'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on remarque que la limaille s'attache surtout à ses extrémités ; il en résulte que la vertu magnétique réside prin-

cipalement dans les extrémités. Coulomb a fait un grand nombre d'expériences pour déterminer l'intensité de la vertu magnétique dans des fils magnétiques; il a trouvé qu'en général la force magnétique était nulle au milieu, que de là elle croissait très-lentement jusqu'à une petite distance des extrémités, d'où elle augmentait avec une très-grande rapidité jusqu'aux extrémités, et qu'à distances égales du centre, les forces magnétiques étaient égales, mais de nature contraire : dans une des expériences, le fil aimanté avait 27 pouces de longueur sur 2 lignes de diamètre : à 6 pouces des extrémités, la force magnétique était équivalente à une torsion de 6°, et croissait jusqu'à l'extrémité où elle était représentée par une torsion de 165°. La figure (326) indique la distribution du magnétisme dans une aiguille, l'intensité magnétique de chaque point est représentée par l'ordonnée qui passe par ce point.

540. Coulomb se servait, pour les expériences en question, de l'appareil (*fig.* 325). Le barreau aimanté mobile étant sur le zéro de la division et dans le méridien magnétique, il fixait verticalement dans la cage et contre le barreau mobile, dans sa position d'équilibre, une règle de deux millimètres d'épaisseur, et il plaçait contre cette règle et de l'autre côté de l'aiguille mobile, un barreau vertical dont le pôle de même nom que celui de l'extrémité la plus voisine de l'aiguille, était à la hauteur de cette aiguille; en faisant glisser le barreau horizontalement contre la règle, on amenait successivement son pôle en regard des différens points de l'aiguille, et dans chaque position elle était écartée de sa direction d'un angle plus ou moins considérable; alors, au moyen du micromètre, on la ramenait à sa position initiale, et la force de répulsion était mesurée par la torsion nécessaire pour produire cet effet.

541. Lorsqu'une aiguille aimantée est brisée en deux ou en un plus grand nombre de parties égales, chaque fragment acquiert deux pôles; ainsi les aimans se comportent comme les piles électriques et les tourmalines.

542. En récapitulant ce qui précède, on trouve que les aimans agissent sur le fer doux par le contact, comme les corps électrisés agissent à distance sur les corps à l'état naturel; car ces derniers acquièrent, comme les aimans, deux pôles électriques contraires, et les aimans semblent se rapprocher des corps non conducteurs qui ont été électrisés par influence, et dans lesquels les fluides électriques ne se dégagent qu'avec une extrême difficulté. Et comme dans l'aimantation les corps magnétiques ne perdent et ne gagnent rien de pondérable, on a admis que tous les corps soumis à l'influence magnétique renferment un fluide naturel, analogue à celui qui résulte de la combinaison des fluides vitreux et résineux, qui est formé de deux fluides particuliers désignés sous les noms de Fluide Boréal et de Fluide Austral, dont les parties similaires sont douées d'une force répulsive, et les parties dissemblables, d'une vertu attractive, et qui peuvent être séparés, dans certaines circonstances, momentanément, ou d'une manière permanente. Mais ces

fluides ne se comportent point exactement comme les fluides électriques. Tous les corps peuvent être électrisés, et il n'en est qu'un très-petit nombre qui peuvent recevoir et exercer l'influence magnétique. L'électricité peut passer d'un corps dans un autre, et les fluides magnétiques ne sortent pas des corps dans lesquels ils ont été développés. On ne peut pas même affirmer que les fluides magnétiques qui se développent dans les différens corps soient identiques; il paraît du moins qu'ils n'agissent pas avec la même intensité; car, d'après l'expérience de M. Gay-Lussac, des barreaux de fer et de nickel, de même forme et de même dimension, mis dans la même position par rapport à une aiguille horizontale que l'on fait osciller, ne diminuent pas la durée des oscillations de la même quantité. Cette différence ne peut pas provenir de l'inégale quantité de fluide naturel renfermé dans les deux métaux, car cette quantité est toujours plus grande que celle qu'on peut décomposer, même dans les circonstances les plus favorables : elle pourrait être due à la différence de force coercitive des deux métaux; cependant cette force est très-petite dans chacun d'eux. Il paraît aussi que quand les fluides magnétiques austral et boréal sont séparés, ils ne le sont que dans chaque particule métallique, et qu'ils ne passent pas d'une molécule à une autre; du moins c'est ce qu'une expérience que nous avons déjà citée autorise à admettre. Lorsque l'on met un morceau de fer en contact avec un aimant, et une série de fragmens de fer en contact avec le premier, après la séparation l'aimant n'a rien perdu, et les autres n'ont rien conservé; par conséquent, les fluides magnétiques développés ne sont pas sortis de chacun de ces corps; et comme le même effet paraît avoir lieu, quelles que soient les dimensions des parcelles métalliques et leur mode de contact, il paraît très-probable qu'il en est ainsi de toutes les parties métalliques qui composent une même masse.

M. Poisson a fait pour le magnétisme ce qu'il avait fait pour l'électricité; sans établir aucune hypothèse sur la nature des fluides magnétiques, mais en partant d'un petit nombre de faits qui résultent de l'observation et de l'hypothèse de Coulomb, que, dans leur séparation, les fluides ne parcourent qu'un espace infiniment petit, ce célèbre géomètre est parvenu à trouver les conditions d'équilibre des fluides magnétiques dans les aimans et les formules qui expriment leur action sur un point extérieur; dans quelques cas particuliers, où ces formules étaient intégrables, il en a déduit des résultats qui ont été pleinement confirmés par l'expérience. Nous allons entrer à cet égard dans quelques détails. M. Poisson considère chaque point d'un corps magnétique à l'état naturel comme renfermant les deux fluides à l'état de combinaison, qui est maintenue par une force d'intensité variable, désignée sous le nom de Force Coercitive. Par l'action d'un aimant étranger, les deux fluides se séparent, s'éloignent à une distance très-petite, y restent par la force inconnue qui empêche les fluides magnétiques de sortir des corps dans lesquels ils ont été dé-

veloppés; mais si le corps est soustrait à l'influence qui a séparé les deux fluides, il rentre dans l'état primitif, ou conserve celui qu'il a reçu, en totalité ou en partie, suivant que la force coercitive du corps sera nulle, ou sera plus ou moins grande. En un mot, on considère les aimans et les corps susceptibles de recevoir l'influence magnétique, comme formés d'un grand nombre de petits corps qui jouissent individuellement des mêmes propriétés que la masse dont ils font partie. M. Poisson appelle *Élémens Magnétiques* l'espace dans lequel les fluides magnétiques s'étendent par leur séparation, et *Lignes Magnétiques*, les lignes droites ou courbes qui sont formées par les lignes polaires des élémens magnétiques.

Lorsqu'un corps sans force coercitive est soumis à l'influence d'un centre magnétique extérieur ou intérieur, dans l'état d'équilibre, la résultante de toutes les actions attractives ou répulsives, sur un élément, doit être égale à zéro; dans le cas où le corps a une force coercitive quelconque, la résultante doit être plus petite que cette force, car autrement il se développerait un nouveau magnétisme; enfin, dans le cas où le corps serait aimanté à saturation, il faudrait, pour que l'équilibre existât, que la résultante totale, pour un point quelconque, fût égale à la force coercitive; de là le moyen de trouver les équations d'équilibre dans chaque cas particulier. M. Poisson a constaté que la résultante des actions de tous les élémens magnétiques d'un aimant était équivalente à l'action d'une couche très-mince, qui recouvrirait la surface du corps, et qui serait formée des deux fluides boréal et austral qui en occuperaient des parties distinctes. En appliquant les formules générales au cas particulier d'une sphère de fer doux, aimantée par l'action du globe, on obtient un grand nombre de résultats qui ont été parfaitement confirmés par des expériences directes faites par M. Barlow.

§ II.

Magnétisme Terrestre.

543. La terre agit comme un aimant dont les pôles magnétiques coïncideraient sensiblement avec ses pôles de rotation : dans l'hypothèse des deux fluides magnétiques, le fluide boréal abonderait autour du pôle nord, et le fluide austral, autour du pôle sud. L'action directrice de la terre sur les aiguilles aimantées se manifeste non-seulement à sa surface, mais encore à de très-grandes hauteurs dans l'atmosphère, et à toutes les profondeurs auxquelles on est parvenu.

544. *Axe Magnétique Terrestre.* Imaginons une aiguille aimantée, d'une ténuité extrême, librement suspendue par son centre de gravité : sa pesanteur étant détruite

par la résistance de son point de suspension, elle pourra prendre autour de ce point toutes les positions possibles. Il est évident que l'aiguille se dirigera parallèlement à la résultante totale des actions attractives et répulsives exercées par la terre sur les élémens magnétiques de l'aiguille. La direction de cette résultante, et par conséquent de l'aiguille, porte le nom d'*Axe Magnétique Terrestre;* l'angle du plan vertical qui la renferme avec le méridien porte le nom de Déclinaison, et son angle avec l'horizon, celui d'Inclinaison. L'observation directe de l'axe magnétique ne saurait avoir lieu, parce que l'on ne peut pas suspendre une aiguille par son centre de gravité de manière à lui faire prendre toutes les positions possibles; mais comme la position de cet axe est déterminée par la déclinaison et l'inclinaison, on observe ces deux élémens avec des appareils séparés.

545. *Déclinaison.* Les appareils dont on se sert pour observer la déclinaison portent le nom de Boussoles; ils sont formés d'une aiguille aimantée ayant la forme d'un losange (*fig.* 327), garnie à son milieu d'une chappe en matière dure, montée sur un pivot et lestée sur la partie sud de manière à ce qu'elle se tienne en équilibre horizontalement; l'aiguille est renfermée dans une boîte munie d'une division circulaire : en plaçant le rayon qui passe par le zéro de la division dans le méridien géographique, l'extrémité nord de l'aiguille indique la déclinaison. Les aiguilles doivent avoir la forme indiquée (*fig.* 327), parce que, d'après les expériences de Coulomb, c'est celle qui, à poids égal, a la plus grande force directrice; elle doit être très-mince, parce que, d'après le même physicien, le frottement de la chappe sur la pointe est proportionnel au poids de l'aiguille, et que l'intensité du magnétisme que peut acquérir une aiguille, croît dans un plus petit rapport que son épaisseur.

546. Si une aiguille horizontale n'avait qu'une largeur infiniment petite, sa direction serait toujours celle de la résultante horizontale des actions magnétiques terrestres; mais dans le cas contraire, qui a toujours lieu, il peut arriver que l'axe de figure ne coïncide pas avec la direction de cette résultante. Pour en concevoir la raison, soit A B (*fig.* 328) une aiguille aimantée; tous les points magnétiques de chaque moitié seront attirés et repoussés par les deux pôles de la terre; par conséquent, sur chaque moitié il y aura un point G par lequel passera la résultante de toutes ces actions. La ligne G G prendra donc la direction des forces parallèles appliquées aux points G, G, et si cette ligne ne coïncide pas avec l'axe de figure, il est évident que les extrémités de l'aiguille n'indiqueront pas la déclinaison. Pour reconnaître si dans une aiguille l'axe magnétique coïncide avec l'axe de figure, il faut la retourner de manière que la face qui était au-dessus devienne la face inférieure; il est évident que l'axe magnétique prendra la position *g g* (*fig.* 329), et que dans cette nouvelle position l'aiguille sera déviée d'une quantité

égale, mais opposée; de sorte qu'en prenant le milieu de l'arc compris entre les extrémités de l'aiguille dans ces deux positions, on aura exactement la déclinaison.

547. L'aiguille de déclinaison est très-souvent employée pour observer la vertu magnétique des minéraux; mais comme elle est quelquefois très-faible, il faut rendre l'aiguille aimantée très-sensible, en diminuant sa force directrice : le meilleur moyen consiste à suspendre à un fil de soie très-délié et sans torsion, une petite tige de cuivre A B (*fig.* 330 *bis*), en travers de laquelle on place deux aiguilles aimantées M N et M' N', dont les forces directrices diffèrent peu; la force directrice de leur ensemble sera très-faible, et, en approchant de l'une d'elles un corps peu magnétique, on obtiendra une déviation sensible.

548. *Inclinaison.* L'appareil dont on se sert pour mesurer l'inclinaison, et qu'on désigne sous le nom de Boussole d'Inclinaison, est composé (*fig.* 331) d'un plateau circulaire divisé A B, que l'on établit horizontalement au moyen de trois vis a, b, c, et de deux niveaux à bulles d'air; il supporte un cercle vertical fixé sur les montans C, D, qui peuvent se mouvoir autour du centre du cercle horizontal. Les pièces horizontales E F portent, à la hauteur du centre du cercle vertical, une aiguille qui repose sur de petits coussinets par un axe très-délié passant par son centre de gravité. Lorsqu'on tourne le plan du cercle mobile de manière qu'il soit perpendiculaire au méridien magnétique, la force directrice de la terre rend l'aiguille verticale, parce que, dans cette position, les forces attractives et répulsives étant dirigées dans le même plan que l'aiguille, elles tendront à la renverser, et cet effort est détruit par la résistance des supports et par le poids de l'aiguille. Lorsqu'on tourne lentement le cercle vertical, l'aiguille s'incline de plus en plus, et atteint son maximum d'inclinaison quand le cercle est dans le méridien magnétique. Pour observer l'inclinaison, on commence par amener le cercle dans l'azimuth où l'aiguille est verticale, et, au moyen du cercle horizontal divisé, on le place à 90° de distance angulaire; il est alors dans le méridien magnétique, et on compte l'inclinaison sur le limbe. Il peut se présenter ici la même cause d'erreur que dans les boussoles de déclinaison : l'axe magnétique peut ne pas coïncider avec l'axe de figure, alors par le retournement on corrige l'erreur; mais il en est encore une autre dont l'influence peut être beaucoup plus grande, c'est le défaut de coïncidence du centre de gravité avec l'axe de rotation; pour reconnaître ce défaut, s'il existe, et en mesurer l'influence, il faut changer les pôles de l'aiguille; il est évident que la déviation de l'aiguille provenant de la cause dont il vient d'être question, se trouvera en sens contraire, et, par conséquent, la demi-somme des inclinaisons observées avant et après le changement des pôles, sera l'inclinaison vraie.

549. *Mesure de l'Intensité du Magnétisme Terrestre.* La direction de l'axe magnétique ne changeant pas sensiblement dans des lieux voisins, il en résulte que l'on

peut regarder comme parallèles les actions exercées par la terre sur chaque point magnétique d'un aimant; par conséquent, une aiguille d'inclinaison est, par rapport à l'action magnétique du globe, comme un pendule relativement à la pesanteur; ainsi en faisant osciller une aiguille d'inclinaison, la durée des oscillations dépendra de son intensité magnétique, de sa longueur et de l'intensité du magnétisme terrestre. En faisant osciller une même aiguille dans différens temps et dans différens lieux, en supposant que l'intensité magnétique de l'aiguille fût invariable, on en déduirait, pour le temps et le lieu de l'observation, l'intensité du magnétisme terrestre: les intensités magnétiques sont alors proportionnelles aux carrés des nombres d'oscillations faites dans le même temps. On emploie cependant rarement à cet usage les aiguilles d'inclinaison, leur mode de suspension produit trop de frottement et occasionnerait de trop grandes erreurs; on fait ordinairement osciller des barreaux aimantés, suspendus à des fils de soie tels qu'ils sortent du cocon: on les rend horizontaux en les attachant au fil de soie au moyen d'un étrier; pour éviter l'influence de l'air, on les renferme dans des cages de verre ou de bois, dont une des faces est garnie d'un verre; les oscillations d'une aiguille horizontale ne déterminent que l'intensité de la composante horizontale de la force magnétique terrestre; mais en combinant cette composante avec l'inclinaison, on en déduit facilement l'intensité de la force totale.

550. La détermination des rapports d'intensité du magnétisme terrestre dans différens lieux et en différens temps présente beaucoup d'incertitude, parce qu'un grand nombre de circonstances peuvent faire varier l'état magnétique de l'aiguille: jusqu'ici on n'avait trouvé aucun moyen de faire disparaître cet inconvénient, mais M. Poisson et M. Arago viennent de découvrir deux méthodes au moyen desquelles les intensités magnétiques peuvent être déterminées avec une grande exactitude: la méthode de M. Poisson consiste à faire osciller deux aiguilles d'inclinaison d'abord séparément, et ensuite sous leur influence mutuelle, en plaçant leur centre de rotation dans une ligne parallèle à l'axe magnétique du globe: la vitesse de ces quatre systèmes d'oscillations, la distance des centres de gravité et leurs momens d'inertie par rapport à leurs axes de rotation, sont liées entre elles de telle manière qu'on en déduit la puissance magnétique de la terre, indépendamment de la force magnétique des aiguilles. Le procédé de M. Arago consiste à mesurer l'intensité magnétique d'une aiguille, indépendamment de la force directrice de la terre; il est fondé sur une observation très-curieuse faite par ce célèbre physicien, et qui consiste en ce que, si l'on fait tourner un plateau métallique sur lui-même, dans le voisinage d'une aiguille aimantée, l'aiguille est entraînée dans le sens de ce mouvement avec une force d'autant plus considérable que sa puissance magnétique est plus grande. En faisant l'expérience dans un plan perpendiculaire à l'axe magnétique,

l'influence de la force directrice de la terre sera nulle; alors les petits contre-poids dont chacune des extrémités devrait être chargée pour que le plateau, tournant avec une certaine vitesse, la déviât de 10°, 20° ou 30°, etc., donnerait la mesure de l'intensité magnétique des pôles. Si l'on admettait la possibilité de produire à différentes époques du fer doux ayant exactement les mêmes propriétés, on pourrait mesurer l'intensité des pôles d'une aiguille, en la plaçant dans un plan perpendiculaire à l'axe magnétique, et mesurant la déviation que lui fait éprouver une même masse de fer à une distance déterminée.

551. *Variations de la puissance et de la direction de l'action magnétique du Globe.*

552. *Variations de la Déclinaison.* La déclinaison est tantôt orientale, tantôt occidentale. Les lignes qui passent par les points où elle est nulle, portent le nom de Lignes sans déclinaison : on en connaît quatre, elles sont très-irrégulières; la première est située dans le grand Océan, entre l'ancien et le nouveau Monde; la seconde commence au-dessous de la nouvelle Hollande et se prolonge jusqu'en Laponie; la troisième communique avec la seconde près du grand Archipel d'Asie, et s'élève jusque dans la partie Orientale de la Sibérie; enfin la quatrième paraît se trouver dans l'Océan Pacifique près des îles des Amis et de la Société. Leur position n'est pas constante.

553. Dans un même lieu, la déclinaison reste quelquefois constante pendant un certain temps : à Paris, de 1720 à 1724, elle a été constamment de 13°. Plus souvent la déclinaison varie ou dans un sens ou dans l'autre. En 1678, à Paris, la déclinaison était occidentale et de 1°,30; elle a augmenté jusques 1818, et parvint à cette époque à 22°, 26°; il paraît, d'après les observations de M. Arago, qu'elle a diminué de 1819 à 1822; la rétrogradation annuelle a été de 1' 55".

554. L'aiguille de déclinaison éprouve des variations diurnes : d'après M. Cassini, le maximum de déclinaison a lieu entre midi et trois heures du soir; elle reste alors stationnaire, se rapproche du méridien jusque vers huit heures du soir, reste stationnaire toute la nuit; la même période recommence le lendemain, vers huit heures du matin, et atteint son maximum entre midi et trois heures. C'est entre les équinoxes du printemps et d'automne qu'ont lieu les plus grandes variations diurnes, et c'est dans l'autre partie de l'année que se manifestent les plus petites. L'étendue de ces variations change avec les lieux : les plus grandes sont, à Paris, de 13' à 16', et les plus petites de 8' à 10'. Plusieurs physiciens ont remarqué qu'il résultait de l'observation de la déclinaison aux mêmes heures du jour, que la pointe nord de l'aiguille marche vers l'est depuis l'équinoxe du printemps jusqu'au solstice d'été suivant, et vers l'ouest le reste de l'année.

555. *Variations de l'Inclinaison.* Dans l'hémisphère boréal, la pointe nord de l'aiguille s'incline vers l'horizon; c'est le contraire dans l'hémisphère austral. La ligne

qui passe par les points du globe sans inclinaison, porte le nom d'Équateur Magnétique; c'est une courbe très-irrégulière, elle coupe l'équateur en quatre points. L'inclinaison augmente à mesure qu'on s'approche des pôles; à une latitude boréale de 79°, 44'; l'inclinaison observée par le capitaine Philipps était de 82°, 9'.

556. *Variations de l'intensité magnétique du Globe.* Il résulte des observations de M. de Humbolt et d'un grand nombre de navigateurs, que l'intensité magnétique du globe augmente à mesure qu'on s'approche des pôles.

§ III.

De l'Aimantation.

557. Nous avons déjà vu que tous les corps susceptibles de devenir magnétiques acquéraient cette propriété par leur contact avec un aimant; mais ces corps peuvent encore devenir magnétiques dans un grand nombre d'autres circonstances, par la percussion, l'écrouissage, l'action de la lime, le passage au laminoir, à la filière, les décharges électriques, en plaçant des barreaux dans la direction de l'axe magnétique terrestre, et enfin au moyen des courans galvaniques : l'aimantation dans ces dernières circonstances est toujours très-faible. L'aimantation que l'on obtient en plaçant une barre dans l'axe magnétique du globe, est évidemment analogue à celle qui a lieu par l'influence d'un aimant à distance; quant à celles qui proviennent des décharges électriques et des courans galvaniques, il en sera question dans le chapitre suivant; dans celui-ci nous ne parlerons que des procédés employés pour donner à des barreaux d'acier la plus forte puissance magnétique au moyen des aimans naturels ou artificiels. Les méthodes jusqu'ici employées sont au nombre de deux, qu'on désigne sous les noms de Simple Touche et de Double Touche.

558. *Méthode de la Simple Touche.* Lorsqu'on met le pôle d'un aimant en contact avec l'extrémité d'un barreau d'acier (*fig.* 332), il se manifeste au point A un pôle contraire à celui de l'aimant, et si le barreau est très-petit et très-court, l'aimant étant très-puissant, l'extrémité B acquerra un pôle contraire à celui du point A. Mais si le barreau a une certaine longueur, l'influence du pôle de l'aimant ne se manifestera que sur une certaine partie A C (*fig.* 333) plus petite que la moitié de sa longueur, le point C sera à l'état naturel; mais la partie C B' étant plus influencée par le magnétisme de A C que par celui de l'aimant, prendra un magnétisme contraire; au delà du point B' l'influence de C B' devenant plus grande que celle de A C, B' C' prendra un magnétisme contraire à B' C, et ainsi de suite; de sorte qu'il en résultera une série de points C, C', C'', etc., à l'état naturel, et entre ces points deux pôles contraires, mais dont l'intensité ira en décroissant à partir du point A; ces pôles intermédiaires portent le nom de Points Conséquens.

559. Lorsqu'on fait glisser le pôle d'un aimant sur un barreau d'acier (*fig.* 334), dans chacune de ses positions, il attire le magnétisme de nom contraire et repousse l'autre; par conséquent, dans son mouvement il fait successivement passer chaque point du barreau par deux états magnétiques différens, et lorsqu'il a quitté le barreau, la dernière extrémité touchée a un pôle de nom contraire à celui de l'aimant, et la première a un pôle de même nom. Ce mode d'aimantation a reçu le nom de Méthode de Simple Touche; elle est bonne pour aimanter des aiguilles courtes et d'une petite dimension; mais elle a l'inconvénient de donner souvent des points conséquens; il suffit même, pour en produire à volonté, de laisser sur un point plus long-temps le pôle de l'aimant.

560. *Méthode de la Double Touche.* Cette méthode produit un développement de magnétisme beaucoup supérieur à celui que l'on obtient par la simple touche; il consiste à promener le long d'un barreau les deux pôles opposés de deux aimans, en laissant les barreaux aimantés couchés (*fig.* 335), perpendiculaires (*fig.* 336), ou inclinés (*fig.* 337), en les faisant mouvoir parallèlement, ou en sens contraire et en armant l'extrémité du barreau que l'on veut aimanter de masses de fer doux, ou de forts aimans (*fig.* 338).

Knight, en 1735, eut le premier l'idée d'employer deux aimans; son procédé consiste (*fig.* 335) à placer bout à bout les pôles opposés de deux forts barreaux aimantés, et au-dessus du barreau que l'on doit aimanter, de manière que son milieu corresponde à leur ligne de jonction, et à séparer les aimans, en les faisant mouvoir chacun de leur côté. On obtient ainsi un effet beaucoup plus grand qu'avec la simple touche.

Duhamel introduisit dans cette méthode un perfectionnement important: il plaçait le barreau à aimanter entre deux barres de fer doux (*fig.* 338); les frictions se faisaient par des barreaux aimantés, comme dans la Méthode de Knight; les armures de fer doux devenant magnétiques, par leur réaction elles produisent un plus grand développement de magnétisme.

Mitchell employa une autre méthode; elle consiste à mettre plusieurs barreaux d'acier en contact à la suite les uns des autres, et à faire glisser sur leur surface et par les pôles contraires deux barreaux aimantés, fixés à une distance constante. Les barreaux intermédiaires se trouvent fortement aimantés.

Æpinus fit à cette dernière méthode une amélioration importante: il plaça de forts aimans à l'extrémité des barreaux d'acier, et il inclina les aimans mobiles sur la surface des barreaux d'acier.

La Méthode d'Æpinus est celle qui donne le plus grand développement magnétique, mais elle a l'inconvénient de produire souvent des points conséquens; celle de Duhamel est exempte de cet inconvénient. La méthode de Duhamel, en

remplaçant les barreaux de fer doux par de forts aimans, est la meilleure que l'on puisse employer pour des aiguilles de boussoles; celle d'Æpinus doit être préférée pour aimanter de forts barreaux.

561. *Des Armatures.* Lorsque les pôles magnétiques sont en contact avec un barreau de fer doux, ce dernier devient magnétique, et en réagissant sur l'aimant, il en augmente l'énergie magnétique. C'est ce que l'on peut facilement vérifier en suspendant à un aimant en fer à cheval (*fig.* 339) un barreau de fer et une balance, on trouve que tous les jours le poids que l'aimant peut soutenir augmente; mais si on détache le fer, le barreau reprend son magnétisme primitif, si l'aimant avait d'abord été aimanté à saturation; mais dans le cas contraire, il conserve ce qu'il a acquis. Les barres de fer doux dont l'on garnit les aimans, portent le nom d'Armatures. On en met aussi aux aimans naturels, non-seulement pour augmenter la force magnétique des pôles, mais encore pour donner au magnétisme de la masse une meilleure direction. Ces armatures sont des plaques de fer doux que l'on applique contre les faces des pôles préalablement polies, et que l'on maintient par des cercles de cuivre (*fig.* 340).

RÉSUMÉ DU CHAPITRE III.

Magnétisme.

Phénomènes Généraux.

Les aimans naturels sont des mines de deutoxide de fer, qui jouissent de la propriété d'attirer le fer, le nickel et le cobalt. Ces attractions se manifestent à distance, dans l'air comme dans le vide; cette faculté n'est point diminuée par le contact des corps étrangers.

Les pôles d'un aimant sont les points où la vertu magnétique a le plus d'énergie; ils sont placés sur des faces opposées. Lorsqu'un aimant est libre de se mouvoir, la ligne des pôles se dirige parallèlement au méridien; lorsque deux aimans sont libres, les pôles de même nature se repoussent, ceux de nature contraire s'attirent. La terre agit comme un aimant dont les pôles coïncideraient sensiblement avec ses pôles physiques.

La faculté magnétique se communique par le contact, au fer, au nickel et au cobalt; le fer la perd immédiatement après le contact; le nickel et le cobalt la conservent en partie; le fer à l'état d'acier trempé ou uni à une petite quantité de phosphore, d'arsenic ou d'étain, la conserve; la trempe et les mêmes substances augmentent la faculté conservatrice du nickel et du cobalt. Les aimans artificiels sont des barreaux d'acier aimantés par leur contact avec des aimans naturels.

Une aiguille librement suspendue dans un plan horizontal, prend une direction qui diffère de celle du méridien; cet écart porte le nom de Déclinaison; une aiguille librement suspendue par son centre de gravité dans le méridien magnétique, reste inclinée à l'horizon sous un angle qu'on désigne sous le nom d'Inclinaison.

Les attractions et les répulsions magnétiques suivent la raison inverse du carré de la distance.

Dans un barreau aimanté, l'intensité magnétique est nulle au milieu; de chaque côté elle augmente lentement en sens contraire, et à une petite distance des extrémités elle augmente avec une grande rapidité. Lorsqu'on divise un aimant en plusieurs parties, chacune acquiert deux pôles. Ces phénomènes semblent indiquer que les corps renferment deux fluides magnétiques analogues aux fluides électriques et qui seraient séparés par des influences semblables.

Magnétisme Terrestre.

Moyens d'Observation. La déclinaison se mesure par l'instrument connu sous le nom de Boussole. L'axe de figure pouvant ne pas coïncider avec l'axe magnétique, il faut effectuer le retournement et prendre la demi-somme des deux déclinaisons. On mesure l'inclinaison au moyen d'un appareil composé d'un cercle vertical que l'on place dans le méridien magnétique et au centre duquel tourne, sur deux pivots, une aiguille magnétique suspendue sur un axe passant par son centre de gravité. Pour corriger l'erreur provenant du défaut de coïncidence de l'axe magnétique avec l'axe de figure, il faut effectuer le retournement, et pour corriger celle provenant du défaut de centrage, il faut changer les pôles.

On mesure l'intensité de la force magnétique terrestre en faisant osciller une aiguille d'inclinaison, ou une boussole de déclinaison; dans ce dernier cas il faut combiner cette force avec l'inclinaison. Ces observations sur l'intensité magnétique de la terre, faites à différentes époques avec la même aiguille, présentent beaucoup d'incertitude, parce que la force magnétique de l'aiguille peut varier. M. Poisson a donné une méthode pour rendre cette détermination indépendante de l'intensité magnétique de l'aiguille, et M. Arago une méthode pour mesurer à chaque fois l'intensité magnétique de l'aiguille.

Variations des Élémens. On connaît quatre lignes sans déclinaison; elles sont irrégulières et changent de position. Dans un même lieu, la boussole éprouve des variations diurnes, et d'autres variations beaucoup plus grandes; on ignore si ces dernières sont aussi périodiques. La ligne sans inclinaison porte le nom d'Équateur Magnétique; il coupe l'équateur géographique en quatre points. L'inclinaison et l'intensité magnétique augmentent à mesure qu'on s'approche des pôles.

Aimantation.

Le fer et l'acier peuvent recevoir la vertu magnétique par l'écrouissage, le laminoir, la filière, les décharges électriques, les courans galvaniques, par l'influence du magnétisme terrestre, en les dirigeant suivant l'aiguille d'inclinaison, et enfin par le contact avec des aimans naturels ou artificiels; c'est toujours ce dernier moyen que l'on emploie.

L'aimantation par la simple touche, consiste à passer sur un barreau d'acier, et toujours dans le même sens, le pôle d'un aimant. L'aimantation par la double touche consiste à promener le long d'un barreau d'acier les deux pôles opposés de deux aimans, en laissant les barreaux aimantés couchés, perpendiculaires, ou inclinés, en les faisant mouvoir parallèlement ou en sens contraire, et en armant l'extrémité du barreau que l'on veut aimanter ou de masses de fer doux ou de forts aimans; les effets que l'on obtient par la double touche sont bien supérieurs à ceux que produit la simple touche.

CHAPITRE IV.

Électricité développée par le Contact.

562. En 1789, Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, en faisant des recherches sur l'irritabilité nerveuse des cadavres de grenouilles, reconnut que quand on mettait en contact les muscles et les nerfs par un arc composé de deux métaux, ces organes éprouvaient de violentes convulsions. Galvani attribua cet effet à une électricité de nature différente que renfermaient les muscles et les nerfs. Volta découvrit que l'effet en question était produit par l'électricité développée dans le contact

des deux métaux qui formaient l'arc de communication. Ce fait, que Volta démontra par des expériences rigoureuses, fut la source d'nn grand nombre de brillantes découvertes.

563. *Les Métaux en contact et isolés se constituent dans deux états électriques opposés.* Si l'on prend deux disques métalliques A et B (*fig.* 341) de nature différente, garnis de manches isolans, et qu'après les avoir appliqués l'un contre l'autre en les tenant par ces manches, on les sépare, ils se trouvent chargés d'électricité contraire; mais comme leur tension électrique est extrêmement faible, il faut accumuler les petites quantités d'électricité développée par chaque contact, dans l'électromètre condensateur (*fig.* 309). On parvient alors, après un certain nombre de contacts, à charger l'instrument, non-seulement de manière à reconnaître l'espèce d'électricité acquise par le disque, mais encore à produire des étincelles. On pourrait supposer que dans cette expérience l'électricité est développée par la pression; mais en soudant bout à bout deux lames métalliques (*fig.* 342), on les trouve encore dans deux états électriques opposés. En opérant avec une lame de cuivre et une lame de zinc soudées bout à bout, tenant la lame de zinc et touchant avec la lame de cuivre le plateau collecteur de l'électromètre que nous supposons être en cuivre rouge, il passe plus d'électricité dans le condensateur que si les deux lames étaient isolées, 1° parce que le zinc communiquant avec le sol, il se développe instantanément plus d'électricité dans le cuivre, par la même raison que le plateau d'une machine électrique donne plus d'électricité quand les coussins communiquent avec le sol, que quand ils sont isolés; 2° parce que le développement de l'électricité étant instantané, à mesure que le cuivre abandonne au plateau collecteur celle qu'il a reçue, il se recharge aux dépens du zinc, et ce dernier aux dépens du sol : il en résulte que l'électromètre prendra par un seul contact une tension égale à celle de la lame de cuivre, et par conséquent que dans un seul contact il acquerra toute la charge qu'il peut recevoir. Si on tenait la lame par l'extrémité cuivre, en touchant le plateau collecteur de cuivre par l'extrémité zinc, on ne pourrait jamais parvenir à charger le condensateur, parce que le zinc ayant déjà le maximum de tension qu'il peut acquérir par le contact du cuivre, celui-ci étant à l'état naturel, le zinc en touchant de nouveau du cuivre isolé ou en communication avec le sol, ne lui cédera point l'électricité qu'il possède et ne pourra point non plus y développer une électricité contraire; mais si on plaçait sur la boule *o* du plateau collecteur un morceau de papier humide, en touchant cette boule avec la lame de zinc, les deux métaux ne seraient plus en contact immédiat, et comme ils communiqueraient par un corps bon conducteur, l'instrument se chargerait.

564. D'après les expériences de Volta, la plus petite différence entre les métaux suffit pour les faire passer, lorsqu'ils sont en contact, dans deux états électriques

opposés : deux plaques d'un même métal, dont une a été frottée avec un troisième, diffèrent assez pour devenir électriques par leur contact. Nous verrons plus tard que des lames métalliques, parfaitement identiques, présentent le même phénomène lorsqu'elles sont soumises pendant leur contact à des températures différentes. On a fait beaucoup d'expériences pour déterminer l'état électrique qu'acquièrent les métaux par leur contact, mais elles n'ont pas été encore assez multipliées pour permettre d'en former un tableau complet. Nous donnons, d'après M. Berzélius, le tableau ci-après, dans lequel chaque métal devient positif ou vitreux, lorsqu'on le met en contact avec ceux qui précèdent, et négatif ou résineux, avec ceux qui suivent :

Or.	Argent.	Plomb.
Iridium.	Cuivre.	Fer.
Rhodium.	Nickel.	Cadmium.
Platine.	Cobalt.	Zinc.
Palladium.	Bismuth.	Manganèse.
Mercure.	Étain.	

565. Les métaux ne sont pas les seuls corps qui deviennent électriques par leur contact. M. Becquerel a reconnu, 1° que les métaux mis en contact avec les acides prennent l'électricité positive, et l'électricité négative lorsqu'ils sont en contact avec les alcalis ; 2° que l'eau se comporte avec les métaux facilement oxidables comme les acides ; 3° que les métaux devenaient aussi électriques par le contact avec la flamme du papier et de l'alcool. La propriété de développer de l'électricité par le contact paraît appartenir à tous les corps ; mais, pour la plupart, les tensions sont si faibles, qu'il faut des instrumens d'une sensibilité extrême pour les reconnaître.

566. *Piles Voltaïques.* Mettons en contact avec le sol (*fig.* 343) un disque de cuivre et plaçons au-dessus un disque de zinc : d'après ce qui précède, le zinc acquerra une certaine quantité d'électricité positive, que nous désignerons par a, et le cuivre sera à l'état naturel ; au-dessus du disque de zinc z plaçons un carton humide h ; ce corps étant bon conducteur partagera l'électricité de z, et celui-ci reprendra au cuivre, et ce dernier au sol, une quantité d'électricité positive nécessaire pour établir dans h la tension primitive de z ; sur le carton mettons un second couple z', c', de zinc et de cuivre disposé comme le premier ; c' prendra de l'électricité à h comme corps conducteur, et la tension a s'établira sur z, h et c, aux dépens du sol. Mais en admettant que dans le couple $z'\,c'$, z' doive avoir sur c' la même différence de tension que z sur c, z' prendra une tension égale à $2\,a$. En continuant à monter la pile de la même manière, on voit que, par la même raison que pour le premier couple, h' et c'' prendront la tension $2\,a$, z'' la tension $3\,a$, etc. Ainsi,

z, z', z'', z'''....... $z^{(n)}$ auront les tensions.... a, $2\,a$, $3\,a$....... $(n)\,a$
c, c', c'', c'''....... $c^{(n)}$ auront les tensions.... o, a, $2\,a$..., $(n-1)\,a$
h, h', h''........... $h^{(n-1)}$ auront les tensions... a, $2\,a$........... $(n)\,a$

Si la pile était montée en sens contraire, c'est-à-dire, si le zinc communiquait avec le sol, la distribution de l'électricité s'y ferait de la même manière, seulement elle serait résineuse ou négative.

Cette loi n'est qu'approximative, car elle est fondée sur plusieurs hypothèses, ou inexactes ou non démontrées; cependant on a reconnu par l'expérience que la tension augmentait avec le nombre des disques. Les hypothèses sur lesquelles repose la loi en question sont : 1° que la différence de tension des deux disques de chaque couple est constante, quelle que soit sa position ; 2° que le liquide interposé entre les couples ne développe point d'électricité ; 3° que ce liquide est un conducteur parfait. La première hypothèse est la plus simple que l'un puisse faire ; mais elle n'a point été reconnue par l'expérience. La seconde n'est pas rigoureusement exacte, car les liquides, par leur contact avec les métaux, développent de l'électricité ; Il résulte des observations de M. Becquerel que l'électricité développée par le liquide dans les métaux qui forment la pile, tend à augmenter la tension. Enfin, la dernière hypothèse de la parfaite conductibilité du liquide est exacte, parce qu'il ne s'agit que de la tension ; les différences de faculté conductrice des liquides se manifestent principalement sous le rapport de la vitesse de transmission, comme nous le verrons plus tard.

567. Si la pile, au lieu de communiquer avec le sol, était isolée, elle se chargerait, aux dépens d'elle-même, des deux espèces d'électricité ; une moitié renfermerait l'électricité positive, et l'autre l'électricité négative ; les tensions des disques, également éloignés du milieu, seraient égales, et elles iraient en croissant du milieu vers les extrémités. En effet, dans le cas dont il s'agit, l'électricité développée doit satisfaire à deux conditions : la première, que la somme totale des électricités développées soit nulle, puisque la charge se fait aux dépens de l'électricité naturelle de la pile ; la seconde, que chaque disque de zinc ait sur celui de cuivre en contact un excès constant d'électricité positive, ou une même différence en sens contraire d'électricité négative, or la disposition énoncée est la seule qui satisfasse à ces conditions.

568. Les piles non isolées donnent des étincelles sensibles, et peuvent charger e condensateur, en mettant leur partie supérieure en contact avec le plateau collecteur ; les piles isolées, au contraire, ne chargent que difficilement le condensateur : par conséquent, elles ont une très-faible tension ; toutes, lorsqu'on met les deux extrémités en contact avec les organes, produisent des commotions analogues aux décharges des bouteilles de Leyde, mais qui sont continues. On a reconnu que l'eau pure conduisait mal l'électricité qui se développe dans l'appareil voltaïque, mais que l'eau chargée d'une petite quantité d'acide conduisait très-bien ; on doit donc tremper les rondelles de carton dans une eau acidulée ; et lorsqu'on veut décharger la pile à

travers les organes, il est nécessaire, pour avoir le maximum d'effet, de mouiller les mains avec le même liquide acide.

569. Comme l'expérience démontre que la pile ne produit d'effets énergiques qu'autant que le liquide conducteur interposé renferme un acide puissant, on avait été conduit à supposer que l'oxigène de l'air pouvait être la cause du développement de l'électricité dans l'appareil. MM. Biot et Frédéric Cuvier constatèrent en effet que lorsqu'une pile, chargée avec une dissolution saline, était placée sous une cloche pleine d'air, une partie de l'oxigène était absorbée; mais, comme on a reconnu depuis que certains effets de la pile restaient sensiblement les mêmes dans l'air plus ou moins raréfié, le concours de l'oxigène ne paraît point nécessaire; il n'est réellement utile que pour les piles montées avec des dissolutions salines; à l'égard de celles qui le sont avec des eaux acidulées, la présence de l'air n'a qu'une influence très-légère sur leur énergie.

570. *Différentes Formes de Piles.* La pile voltaïque, telle que nous venons de la décrire, présente plusieurs inconvéniens que l'on a fait disparaître par une autre disposition; le premier consiste en ce que les disques s'oxidant facilement, toutes les fois qu'on remontait la pile, il fallait nettoyer les faces des disques qui devaient être en contact, sans quoi on n'obtenait qu'une très-petite partie de l'électricité qu'elle pouvait développer; le second consiste en ce que chaque rondelle de carton supportant le poids des disques supérieurs, le liquide s'en écoulait; ils devenaient alors moins bons conducteurs, et le liquide en ruisselant le long de la pile, la déchargeait en partie. On a fait disparaître ces deux inconvéniens en soudant les disques et en plaçant la pile dans une position horizontale. Nous allons décrire les principales dispositions qu'on a employées.

571. La figure 344 représente une pile composée d'une série de plaques de cuivre et de zinc, soudées bout à bout et plongeant par leurs extrémités dans des verres remplis de liquides conducteurs. Il est évident que cet appareil satisfait à toutes les conditions nécessaires au développement de l'électricité : Volta le désigne sous le nom d'Appareil de Tasses à couronne. L'appareil (*fig.* 345) désigné sous le nom de Pile à Auge, est formé de couples rectangulaires soudés et mastiqués avec une matière isolante dans une caisse horizontale; on remplit les intervalles des plaques avec un liquide conducteur : il est évident que la disposition est la même que dans la pile verticale. L'appareil (*fig.* 346) est une nouvelle forme de pile très-employée; les plaques de cuivre et de zinc sont soudées par un prolongement étroit, et disposées comme l'indiquent les figures 347 et 348; la lettre *c* indique le cuivre et la lettre *z* le zinc. Lorsqu'on veut mettre la pile en activité, on descend la barre horizontale A B (*fig.* 346) de manière à faire plonger les plaques dans les vases D remplis de liquide conducteur. On emploie quelquefois la réunion de plusieurs piles; il faut alors les faire communiquer par les pôles différens au moyen d'un fil métal-

lique. On fait souvent usage d'appareils voltaïques formés d'un seul couple de grandes dimensions : la disposition la plus commode à donner à cet appareil est représentée (*fig.* 349) ; il est formé de deux plaques de cuivre et de zinc, séparées par une bande de carton ou de drap et roulées en spirale sans se toucher ; on introduit cet appareil dans un vase plein de liqueur conductrice et on fait communiquer les deux plaques par un fil ab ; cet appareil n'acquiert point de tension, car la communication des plaques est établie et par le liquide conducteur, et par le fil ab ; mais le courant électrique qui s'établit dans ce fil par les décharges continuelles est employé pour différentes expériences dont nous parlerons plus bas.

572. *Piles Secondaires de Ritter.* Volta avait remarqué que quand on met en communication avec les deux pôles d'une pile voltaïque isolée, un corps faiblement conducteur, tel qu'une bande de papier humide, mouillée par de l'eau pure, les deux extrémités de la bande se chargeaient d'électricité contraire et de même nature que celle des pôles auxquels elles communiquent, et que si on enlève la bande de papier avec un isoloir, les deux extrémités restent électrisées pendant un certain temps. Les piles de Ritter sont fondées sur le même principe : elles sont formées de disques de cuivre et de cartons humides entremêlés ; elles ne développent point d'électricité par elles-mêmes, mais elles peuvent être chargées par leur communication avec une pile ordinaire ; ces piles, une fois chargées, perdent leur électricité très-lentement, et produisent, lorsqu'on touche leurs pôles, des décharges semblables à celles de la pile ordinaire, mais qui vont en s'affaiblissant jusqu'à ce que toute l'électricité qu'elles avaient reçue se soit neutralisée. M. Ritter a observé que plus il y avait d'intermittences dans les disques, leur nombre restant le même, plus la conductibilité était petite, et plus la charge que la pile pouvait recevoir était grande.

573. *Piles Sèches.* On a fait beaucoup d'essais pour construire des piles sans l'intervention des conducteurs liquides ; on a obtenu des appareils qui ont une tension sinon permanente, du moins de longue durée, mais dont la faculté conductrice est si faible, et par conséquent la charge si lente, qu'ils ne produisent ni commotions ni aucun des autres effets des piles ordinaires. M. Hachette a construit de ces piles sèches avec de minces plaques métalliques séparées par des couches de colle de farine mêlée de sel marin ; ces piles chargent instantanément le condensateur. M. Zamboni a fait des piles sèches avec des disques de papier doré ou argenté, recouverts sur l'autre face d'oxide noir de manganèse pulvérisé.

574. M. Séebek a découvert que l'on pouvait produire des courans électriques avec des métaux, sans l'interposition des liquides. En effet, si l'on soude deux arcs métalliques, par exemple de cuivre et de bismuth, de manière à faire un circuit fermé, en chauffant l'une des soudures, il se formera dans la partie non échauffée un courant qui se dirigera du cuivre au bismuth, et que l'on pourra facilement reconnaître au moyen d'une aiguille aimantée. MM. Fourier et Œrsted ont observé

que l'on peut augmenter l'effet électro-dynamique par la répétition alternative des barreaux : il faut alors chauffer les soudures de deux en deux. Dans ces appareils, les effets diminuent à mesure que la longueur augmente : il en résulte que si la longueur augmente comme le nombre des barreaux, l'effet reste constant. Un fil mince d'un métal cristallin formant un circuit fermé et dont les parties sont inégalement échauffées, produit également un courant électrique. Depuis, M. Becquerel est parvenu à produire les mêmes effets avec un circuit d'un seul métal quelconque. Ces courans ne sont sensibles que sur l'aiguille aimantée et ne produisent ni ignition ni phénomènes chimiques.

575. *Effets des Piles Voltaïques.* Dans une pile voltaïque isolée, composée de deux métaux et d'un liquide conducteur d'une force électromotrice nulle ou insensible, les deux pôles ont une tension que l'on peut souvent reconnaître directement en approchant à une petite distance deux fils métalliques communiquant avec les pôles, ou au moyen du condensateur. Quand la pile a été déchargée par la communication instantanée des deux pôles, elle se recharge d'elle-même, mais avec une vitesse qui dépend de la faculté conductrice du corps qui sépare les couples. Lorsque cette vitesse est très-grande, elle charge instantanément le condensateur, et quand on met les deux pôles en communication par un corps bon conducteur, les décharges continuelles forment dans ces derniers deux courans opposés, l'un d'électricité positive qui va du pôle positif jusqu'au pôle négatif, et l'autre d'électricité négative qui se meut en sens contraire: ces courans produisent de violentes commotions, des combustions, des décompositions chimiques, etc.; mais il faut pour cela qu'ils aient une grande vitesse, et par conséquent que les liquides de la pile soient d'excellens conducteurs. C'est parce que, dans les piles sèches, les corps solides interposés conduisent mal l'électricité, qu'elles ne produisent ni commotions ni décompositions chimiques, et c'est par la même raison que l'énergie des piles ordinaires diminue à mesure que les acides qu'elles renfermaient sont neutralisés, ou décomposés par les disques métalliques. Pour concevoir l'énorme vitesse que doivent avoir les courans dont nous parlons, rappelons-nous que les piles sèches chargent dans un seul contact le condensateur ; or pendant la durée inappréciable de ce contact, la pile s'est chargée et déchargée plusieurs fois, car la faible tension de ses pôles n'agit pas sensiblement sur l'électroscope; cependant la grande vitesse que l'on doit supposer dans l'électricité qui se développe dans ses élémens n'est point suffisante pour produire une commotion ou des décompositions chimiques; mais l'interposition d'un acide étendu d'eau fait à l'instant naître tous ces phénomènes.

L'électricité qui se développe dans les phénomènes voltaïques, est de même nature que celle qui résulte du frottement; cependant nous trouvons une grande différence dans la faculté des mêmes corps pour les conduire l'une et l'autre; mais c'est qu'ici il y a un

élément nouveau dont nous n'avons point tenu compte en parlant de l'électricité développée par le frottement, c'est la vitesse : les corps, sous le rapport de la vitesse de propagation, présentent des différences comme nous en avons trouvé sous le rapport de la tension.

576. Les effets produits par les piles voltaïques peuvent être rangés en deux classes ; ceux qui proviennent de la tension des pôles, et ceux qui résultent des courans développés dans les corps plus ou moins bons conducteurs qui communiquent avec les pôles : nous examinerons successivement ces deux classes de phénomènes.

Effets produits par la Tension des Pôles.

577. Nous avons déjà dit que la tension des pôles d'une pile peut souvent se reconnaître directement, ou en approchant l'un de l'autre deux fils métalliques très-fins, communiquant avec eux : quand ils sont assez voisins, il se dégage souvent une petite étincelle. Dans tous les cas, on peut charger un condensateur, une bouteille de Leyde, etc. ; on obtient alors des phénomènes absolument semblables à ceux qui résultent de l'accumulation de l'électricité produite par le frottement. Van Marum, de Harlem, a observé que la tension d'une pile dépendait uniquement du nombre des couples et nullement des dimensions des plaques. La charge que peut acquérir le condensateur a lieu par un seul contact instantané pour les piles ordinaires et même pour les piles sèches, à moins que le corps solide interposé entre les plaques ne soit très-mauvais conducteur ; alors la charge exigerait un temps appréciable : c'est ce que M. Biot a reconnu en employant des plaques de nitre fondu. Il faut observer que pour charger le condensateur, la communication doit être établie de la manière la plus intime entre la pile et le plateau collecteur ; la disposition la plus avantageuse, d'après M. Biot, est celle de la figure 350 : au-dessus de la pile on met un petit godet en fer, plein de mercure, dans lequel plonge le fil qui communique avec le condensateur.

578. Au moyen de la pile, M. Ermann a fait des observations très-curieuses sur la faculté conductrice des corps pour l'électricité sous une faible tension. Si l'on fait communiquer les pôles d'une pile isolée avec deux électroscopes à feuille d'or, tous deux sont électrisés ; si alors on prend un cylindre de savon sec, à l'une des extrémités duquel on insère un fil métallique, en mettant ce dernier en communication avec le sol et le savon en contact avec une des extrémités de la pile, l'électroscope correspondant revient à l'état naturel, et l'autre indique une plus forte tension : le savon remplit donc alors l'office de bon conducteur pour l'une et l'autre électricité. Mais si on fait communiquer les deux pôles de la pile par un fil métal-

lique isolé, interrompu par le savon, les électroscopes continuent à indiquer la même tension, et par conséquent le savon agit comme mauvais conducteur; enfin si on touche le savon avec un corps bon conducteur, le pôle résineux seul est neutralisé : le savon ne conduit donc alors que le fluide résineux. La flamme d'alcool a présenté les mêmes phénomènes, mais sa faculté conductrice est en faveur du fluide vitreux; la flamme du phosphore, la gélatine, l'ivoire, ont donné les mêmes résultats. Ces phénomènes s'expliquent très-bien en admettant dans chacun de ces corps une différence de conductibilité pour les deux fluides, qui ne devient sensible que pour les petites tensions.

579. On a employé les piles sèches, dont la tension est permanente quoique très-faible, pour produire une espèce de mouvement perpétuel. Si on place deux piles sèches parallèlement (*fig.* 351), de manière que les pôles supérieurs A et B soient de nature différente, et entre les piles une aiguille isolée, elle sera successivement attirée et repoussée par les deux pôles, et prendra un mouvement oscillatoire qui durera tant que la pile conservera une tension sensible; on a construit de ces appareils qui ont marché pendant plusieurs années.

580. M. Bohnenberger a fait une heureuse application des piles sèches à la construction d'un électroscope condensateur, d'une sensibilité extrême : cet appareil, perfectionné par M. Becquerel, est formé d'une pile sèche renfermée dans un cylindre de verre, et posée horizontalement sur un support en bois; les pôles sont garnis de deux plaques de laiton, qui s'élèvent en se rapprochant et restent parallèles dans une longueur de trois pouces; une cage de verre qui enveloppe cet appareil est percée de manière à laisser passer un fil de laiton qui suspend une lame d'or de deux à trois pouces de longueur, au milieu de l'intervalle des lames de cuivre et parallèlement à leur direction; le fil de cuivre, au delà de la cage, est renfermé dans un tube de verre et se termine par un bouton, sur lequel on visse un condensateur de neuf pouces de diamètre. La plus faible quantité d'électricité développée dans le plateau collecteur, se transmet à la feuille d'or par la séparation du plateau qui communique avec le sol; elle cesse alors d'être également attirée par les deux plaques de laiton, et se rapproche de celle dont l'électricité est contraire à celle qu'elle a reçue. La sensibilité de cet appareil est telle que, d'après M. Becquerel, dans un temps sec un tube de verre frotté avec du drap agit sur cet instrument à une distance de dix pieds.

581. M. Rousseau a appliqué les piles sèches à la détermination de la faculté conductrice des différens corps; cet appareil (*fig.* 352) est formé d'un gâteau de résine A B, sur lequel est fixé un conducteur en cuivre C A, terminé au centre du plateau par une tige C N conductrice, qui s'effile en une pointe aiguë sur laquelle repose une aiguille faiblement aimantée D O, dont l'extrémité est garnie d'un disque de cuivre O;

le conducteur C A porte une tige de cuivre verticale mobile autour de la charnière i, et garnie, à la hauteur de l'aiguille, d'une boule de cuivre O'; l'extrémité du conducteur C A reçoit une petite capsule métallique, destinée à contenir le liquide ou le corps dont on veut éprouver la faculté conductrice; enfin, à une certaine distance du plateau se trouve une pile sèche communiquant par sa base avec le sol, et garnie à son sommet d'une tige métallique qui plonge dans le vase A sans en toucher les parois. Le plateau est recouvert d'une cloche portant une division à la hauteur de l'aiguille. Pour se servir de cet instrument, on enlève le fil $a\,b$, on tourne la cage de manière que le disque de l'aiguille touche la boule O'; ensuite on place dans la capsule A le corps sur lequel on doit opérer, et on le fait toucher par le fil $a\,b$; si le corps est bon conducteur, le disque O est repoussé par la boule O', parce que tous deux sont électrisés de la même manière. M. Rousseau a ainsi reconnu que les huiles de graines conduisent bien l'électricité, que l'huile d'olive ne la conduit presque pas, mais qu'en ajoutant à cette dernière une très-petite quantité d'huile de graine, elle devient conductrice; cet appareil présente alors un très-bon moyen pour reconnaître les huiles d'olive falsifiées, mais il ne donne pas la mesure de la quantité d'huile de graine qu'elles renferment.

Effets produits par les Courans Électriques.

582. *Ignition et Fusion des Corps.* Lorsque les deux pôles d'une pile électrique sont mis en communication par un fil métallique, toute tension des pôles cesse à l'instant même, et un double courant électrique traverse le fil. Dans les piles d'un même nombre de couples, la densité du courant est proportionnelle à la surface des plaques, puisque la tension d'une pile ne dépend que du nombre des couples; et sa vitesse dépend de la faculté conductrice du liquide interposé. Les effets que produisent ces courans dans le fil métallique, sont les mêmes que ceux que nous avons observés dans les mêmes circonstances pour les décharges des batteries électriques; si les fils sont d'une ténuité suffisante, ils s'échauffent, rougissent, fondent, brûlent ou se volatilisent. On remarque que quand les fils sont trop longs pour rougir dans toute leur étendue, la partie incandescente se trouve au milieu de leur longueur. Pour obtenir ces effets sur des fils d'un grand diamètre, il faut des appareils très-puissans; mais lorsqu'on emploie des fils d'une grande ténuité, de très-petites piles peuvent suffire : M. Wolaston est même parvenu, avec un seul couple d'une petite dimension, à produire l'incandescence d'un fil de platine d'une finesse extrême, et qu'il obtenait par le procédé suivant : il plaçait un fil de platine dans l'axe d'un moule cylindrique dans lequel il coulait ensuite de l'argent; en tirant ce cylindre d'argent au laminoir, il obtenait un fil très-délié, qui ren-

fermait un fil de platine plus délié encore; en plongeant ce fil dans l'acide nitrique, l'argent était dissous et il restait un fil de platine à peine visible, dont le diamètre quelquefois n'excédait pas $^1/_{100}$ de millimètre; le même procédé pourrait servir à faire des fils de fer, mais il faudrait se servir du mercure pour dissoudre l'argent.

583. En employant de très-fortes piles, telles que celle de l'Institution Royale de Londres, qui est formée de 2000 couples de 4 pouces de côte, on observe que si l'on fait communiquer avec les pôles de petits cônes de charbon sec, lorsqu'ils sont à une petite distance, l'étincelle commence à s'élancer de l'un sur l'autre; la continnité des décharges forme, entre les deux pointes, un jet de lumière continu, d'un éclat supérieur à celui de toutes les autres lumières, et d'une température si élevée, que le diamant et la plombagine y sont volatilisés; les pointes de charbon penvent alors être éloignées jusqu'à la distance de quatre ponces, sans que le jet lumineux soit interrompu. Dans l'air raréfié ou dans le vide, ces phénomènes ont encore lieu et avec plus d'intensité; dans cette dernière circonstance, l'expérience peut durer plusieurs heures sans que le charbon diminue d'une quantité sensible.

584. *Effets Chimiques.* Le premier effet chimique obtenu par les courans électriques continus, a été la décomposition de l'eau; cette importante découverte a été faite par MM. Carlisle et Nickolson. On peut la vérifier d'une manière très-simple en plongeant deux fils de platine communiquant avec les pôles d'une pile dans un vase plein d'eau, tenant en dissolution un sel ou un acide; le gaz oxigène se dégage autour du fil immergé qni communique avec le pôle vitré, positif ou zinc, et l'hydrogène se dégage du fil communiquant avec le pôle négatif, résineux ou cuivre: si on employait de l'eau pure, sa faculté cundnctrice ne serait pas assez grande, et l'eau ne serait pas décomposée; si on se servait de deux fils d'un métal facilement combustible, l'oxigène se combinerait avec le métal et l'on obtiendrait seulement un dégagement d'hydrogène. On peut monter l'appareil de manière à recueillir les gaz. Il faut mettre l'eau acidulée ou chargée de sels dans un entonnoir (*fig.* 353), dont le fond large est fermé par un bouchon mastiqué, à travers lequel passent deux fils de platine qui s'élèvent à quelques centimètres, et dont les prolongemens inférieurs communiquent avec les pôles d'une pile: en recouvrant les fils avec deux petites cloches pleines de liquide, les gaz dégagés se réunissent dans les cloches, et on peut facilement en déterminer la nature et le volume; on obtient, ainsi que l'indique la composition de l'eau, un volume d'oxigène et deux volumes d'hydrogène. MM. Gay-Lussac et Thénard, qui ont fait beaucoup d'expériences pour chercher s'il existait un rapport simple entre la quantité d'eau décomposée et la quantité de sels en dissolution, n'ont obtenu aucun résultat satisfaisant.

585. Si l'on plonge dans de l'eau légèrement acidulée par de l'acide sulfurique ou nitrique, un fil de zinc et un fil d'argent, tant que les deux fils seront isolés,

celui de zinc se dissoudra et dégagera seul de l'hydrogène; mais si on les fait toucher extérieurement, tous deux dégageront du gaz hydrogène. Il est évident qu'alors il s'établira un courant dans le liquide qui sépare les deux fils; l'eau sera décomposée sur l'un et sur l'autre, par la seule influence du courant, l'hydrogène se dégagera sur le fil d'argent, et l'oxigène sur le fil de zinc, avec lequel il se combinera, et comme le zinc, par son action directe sur l'eau acidulée, la décompose, une autre portion de ce liquide sera décomposée sur le fil de zinc, il en absorbera l'oxigène et en dégagera l'hydrogène. La décomposition de l'eau a lieu dans quelques circonstances particulières lorsque le circuit électrique est fermé; par exemple, si un fil de zinc et d'argent étaient soudés (*fig.* 354) et formaient un circuit fermé, quand les points de jonction sont immergés, le dégagement de gaz a lieu sur les deux métaux, parce que l'électricité développée aux points de jonction passe à travers le liquide conducteur environnant et forme encore un courant; le même effet aurait lieu pour deux plaques qui seraient soudées bout à bout (*fig.* 355); ces derniers phénomènes ont été observés par M. Gay-Lussac.

586. Cruikshanks répétant l'expérience de la décomposition de l'eau, en employant une dissolution d'acétate de plomb, reconnut que le plomb à l'état métallique se déposait au pôle négatif; les dissolutions de cuivre et d'argent lui donnèrent des résultats analogues. M. Davy démontra ensuite que tous les sels étaient décomposés par la pile, que l'acide se portait au pôle positif et l'oxide au pôle négatif. On peut facilement constater ce fait en mettant une dissolution saline colorée en bleu par une infusion de chou rouge, (substance qui se colore en rouge par les acides, et en vert par les alcalis et qui est d'une sensibilité extrême), dans un cube recourbé, (*fig.* 356) et plongeant dans chaque branche un fil de platine qui communique avec la pile; la liqueur qui environne le fil positif prend une teinte rouge, et celui qui baigne le fil négatif passe au vert. Ces effets sont appréciables avec une si petite quantité de sels, que de l'eau distillée parfaitement pure a donné des signes d'acidité et d'alcalinité; mais l'alcali provenait du verre, et l'acide de l'oxigène de l'eau qui, à l'état de gaz naissant, avait formé de l'acide nitrique avec l'azote de l'air. MM. Berzélius et Hyzinger reconnurent ensuite que tous les acides et les oxides étaient aussi décomposés par la pile, que l'oxigène se rendait au pôle positif et la base au pôle négatif. Dans la décomposition des hydracides, l'hydrogène se rend toujours au pôle négatif, et la base au pôle positif. Enfin, M. Davy parvint à décomposer par le même moyen la potasse et la soude, et M. Seebeck les autres alcalis, qui furent alors reconnus pour des oxides métalliques. Nous donnerons quelques détails sur la réduction de la potasse.

587. Comme les bases des alcalis sont des métaux extrêmement oxidables à l'air, et qui décomposent l'eau à la température ordinaire, on ne pouvait employer que la potasse sèche, et on n'obtenait que des atomes de métal qui se détruisaient presque

aussitôt. Le docteur Seebeck découvrit un moyen très-simple de soustraire le métal à l'action de l'air. Ce procédé consiste à former, avec de l'hydrate alcalin solide, une masse semblable à un verre de montre; on en remplit la cavité de mercure, on la place sur une plaque métallique que l'on fait communiquer avec le pôle positif et l'on plonge le fil négatif dans le mercure. Le métal alcalin réduit se combine avec le mercure, tandis que l'oxigène de l'alcali et de l'eau se rend au pôle positif. Pour que cette décomposition ait lieu, il faut employer une pile assez énergique, au moins de 50 paires de 2 à 3 pouces de côte. Lorsqu'on veut seulement reconnaître la présence du métal alcalin dans le mercure, il suffit de le jeter dans l'eau; il se dégage de l'hydrogène et l'eau devient alcaline; pour retirer le métal de l'amalgame, on prolonge l'opération, en renouvelant de temps en temps le mercure et jetant l'amalgame dans de l'huile de naphte; lorsqu'on a recueilli une suffisante quantité d'amalgame, on le distille avec l'huile dans une cornue de verre; l'huile et le mercure se volatilisent, et on trouve le métal alcalin pour résidu. MM. Gay-Lussac et Thénard ont ensuite découvert un procédé purement chimique beaucoup plus simple pour obtenir le potassium et le sodium.

588. Toutes ces décompositions chimiques présentent un phénomène très-remarquable; c'est que les élémens du corps décomposé ne se dégagent ou ne se précipitent que sur les fils communiquant avec les pôles de la pile. Ce transport des élémens séparés paraît encore bien plus extraordinaire dans plusieurs expériences de MM. Berzélius et Hysinger. Si l'on met du sulfate de soude dans deux coupes séparées et communiquant par un fil d'amiante, en plongeant le fil positif dans l'une, et le fil négatif dans l'autre, le sel est décomposé, et au bout de quelques heures tout l'acide se trouve dans une des coupes, et tout l'oxide dans l'autre. Si l'on met dans les deux coupes des sels différens, les deux acides passent dans une coupe et les deux oxides dans l'autre; si un place entre deux coupes chargées l'une de sel et l'autre d'eau pure, une troisième coupe communiquant avec les deux autres par des fils d'amiante et renfermant une matière colorante facilement altérable par les acides et les alcalis, telle qu'une infusion de chou rouge, le sel renfermé dans la première coupe sera décomposé, son acide et sa base se réuniront dans les coupes où plongent les fils, et le liquide intermédiaire à travers lequel un acide ou un alcali ont passé, suivant que l'on aura plongé dans la dissolution saline le fil négatif ou le fil positif, n'aura subi aucune altération. En général, les élémens séparés par des courans électriques peuvent traverser des dissolutions de corps ayant pour eux une grande affinité, sans que la combinaison ait lieu; il n'y a qu'une seule exception, c'est quand le liquide renferme une substance qui en se combinant avec l'élément entraîné peut former un corps insoluble : alors la combinaison s'effectue. M. de La Rive a reconnu que la quantité du corps décomposé

augmentait avec l'étendue de la surface métallique des pôles immergés, et qu'en interposant des diaphragmes métalliques entre les pôles, il se formait des précipités contre chaque face de ces lames.

589. On a fait plusieurs hypothèses pour expliquer cette accumulation des élémens séparés par le courant électrique; toutes sont fondées sur ce que les élémens possèdent ou reçoivent, à l'instant de la décomposition, une électricité contraire : c'est un fait que nous démontrerons plus tard. M. Biot, se fondant sur l'expérience de la bande de papier humide de Volta (572), suppose que tout le liquide placé entre les deux pôles se partage, comme la bande de papier, en deux parties douées d'un état électrique différent, et que les élémens du corps décomposé, en dissolution dans le liquide, ayant des états électriques opposés, tendent à se porter dans la partie du liquide qui possède une électricité contraire à la leur. Grotthus admet une décomposition opérée à chaque pôle de la pile par les électricités contraires des élémens du corps; mais il admet en outre que toutes les molécules comprises entre les deux pôles éprouvent une décomposition et une recomposition successives; de sorte qu'il n'y a que les élémens opposés des molécules extrêmes qui, ne se recomposant pas, se dégagent ou se précipitent aux pôles; par exemple, pour la décomposition de l'eau, la molécule qui est immédiatement en contact avec le pôle positif est décomposée, l'atome d'oxigène se dégage, et l'atome d'hydrogène s'empare de l'atome d'oxigène de la molécule suivante; l'hydrogène mis en liberté agit de la même manière sur la molécule d'eau suivante, et ainsi de suite jusqu'au pôle négatif, où l'atome d'hydrogène se dégage. Enfin, dans la dernière hypothèse émise par M. de La Rive, ce physicien admet que le double courant électrique qui traverse le corps, le décompose, et chacun d'eux entraîne avec lui les molécules douées d'une électricité contraire, traverse avec elles la masse totale du liquide, et les dépose sur les conducteurs solides, à travers lesquels ils ne peuvent pas les charier. Cette dernière hypothèse paraît seule, du moins jusqu'ici, se concilier avec les faits observés; c'est ce que nous allons mettre en évidence.

Dans l'hypothèse de M. Biot, la décomposition du corps proviendrait uniquement de la tension; ce corps ne serait pas traversé par le courant, et il devrait être mauvais conducteur. Or, le corps n'est pas décomposé par une simple tension, car quand on met en contact les fils avec les deux pôles contraires de deux piles différentes, il n'y a ni dégagement, ni précipitation. Le liquide est traversé par le courant; car, quand la décomposition a lieu, il n'existe plus de tension aux pôles, et l'aiguille aimantée, comme nous le verrons plus tard, constate que le double courant traverse le liquide. En troisième lieu, la décomposition se fait avec d'autant plus d'énergie, que le corps est meilleur conducteur. De plus, dans cette hypothèse, les élémens séparés se trouveraient libres dans toute la masse liquide; ce qui n'a pas lieu

quoique ce fait semble résulter de l'expérience suivante : si dans l'appareil (*fig.* 356) on décompose un sel en dissolution dans une eau colorée, le liquide renfermé dans une des branches devient rouge, et l'autre vert ; mais cet effet est le résultat des actions de l'acide et de l'alcali qui se sont développés uniquement sur les pôles ; M. de La Rive l'a démontré en divisant un vase en trois parties par des parois en vessies ; en introduisant la même dissolution saline colorée dans ces trois compartimens et plongeant les fils dans les loges extrêmes, le liquide des loges extrêmes a seul été coloré.

Dans l'hypothèse de Grottbus, il est peu probable qu'une même cause produise deux effets opposés ; mais elle n'est admissible que pour un liquide homogène, car, pour qu'il se fasse de l'un à l'autre pôle des décompositions et recompositions successives, il faut nécessairement que le même corps se trouve entre les deux pôles. Or, comment expliquer le passage d'un acide ou d'un alcali à travers un liquide qui n'est formé que d'eau pure ? Ainsi, cette hypothèse n'a aucune probabilité.

L'explication de M. de La Rive n'est que l'expression des faits observés ; car c'est aux doubles courans que sont dues les décompositions. Les élémens séparés éprouvent un véritable transport, puisqu'on les trouve là où le corps qui les a produits n'existe pas, et M. de La Rive a reconnu, par une expérience directe, que les décompositions avaient lieu aux deux pôles. D'après cela, il faudrait admettre une espèce d'affinité entre les molécules et les courans électriques ; mais cette conséquence ne présente rien d'inadmissible ; car nous verrons plus tard que toutes les actions chimiques développent des courans électriques.

590. Les effets chimiques dont nous venons de parler exigent des piles formées d'un grand nombre de couples, c'est le contraire de ce que l'on a observé pour produire les phénomènes électro-dynamiques dont nous parlerons plus tard. M. de La Rive, à la suite d'un grand nombre d'expériences très-curieuses, est parvenu à trouver la raison de cette différence ; il a reconnu, 1° que si l'on divise un vase, renfermant une dissolution saline, en plusieurs compartimens par des lames métalliques, la diminution d'intensité que le courant éprouve en traversant ces lames sera d'autant plus petite que le courant sera plus énergique et que, pour chaque intensité, il proviendra d'une pile renfermant un plus grand nombre de couples ; 2° que de deux courans, ayant la même intensité, l'un à la sortie de la pile, le second après avoir traversé plusieurs lames métalliques séparées par un liquide conducteur, le premier diminue beaucoup plus par l'interposition d'une lame métallique que le second ; 3° que les métaux interposés diminuent d'autant moins l'énergie du courant que le métal est plus oxidable ; 4° que les courans éprouvent, en passant à travers des conducteurs liquides imparfaits, tels que l'eau pure, la même modification qu'en passant à travers des plaques métalliques ; ils traversent des plaques métalliques et de nouveaux conducteurs imparfaits avec d'autant plus de facilité

qu'ils en ont déjà traversé davantage. On voit d'après cela que, pour produire des décompositions chimiques, qui ont toujours lieu dans des liquides qui sont des conducteurs imparfaits, et les phénomènes de chaleur et de lumière qui se manifestent lorsqu'on fait passer les courans à travers des fils très-minces et qui peuvent alors être assimilés aux corps imparfaitement conducteurs, il faut que les piles aient une grande énergie, que les courans, en sortant des pôles, aient déjà traversé un grand nombre de plaques métalliques, afin qu'ils puissent facilement traverser le liquide ou le fil métallique, et, par conséquent, que les piles soient formées d'un grand nombre de couples; pour les phénomènes électro-dynamiques, comme les courans passent toujours à travers des conducteurs métalliques d'un diamètre suffisant, il faut qu'ils aient une grande énergie, et que leur vitesse soit diminuée par le plus petit nombre possible d'intermittences de corps liquides; par conséquent, que la pile ait un petit nombre de couples, et qu'ils soient de grande dimension.

591. *Actions des Courans sur l'Aiguille Aimantée.* En 1819, M. Œrsted, de l'Académie de Copenhague, découvrit que l'aiguille aimantée était déviée de sa direction par le voisinage d'un fil conducteur, dont les extrémités étaient en communication avec les pôles d'une pile, et dans lequel, par conséquent, existaient les doubles courans électriques. Pour bien concevoir la nature de cette action, nous appellerons direction du double courant celle de l'électricité positive ou vitrée; ainsi le courant est, en dehors de la pile, du zinc au cuivre, et dans la pile, du cuivre au zinc (*fig.* 357). Supposons que le fil conducteur soit parallèle au méridien magnétique, et le courant dirigé du sud au nord; si le fil est placé au-dessus de l'aiguille (*fig.* 358), le pôle nord de l'aiguille est dévié vers l'ouest; si le fil est placé au-dessous (*fig.* 359), le nord de l'aiguille est dévié à l'est; si on place le conducteur à droite ou à gauche, l'aiguille n'éprouve aucune déviation horizontale, mais elle s'incline à l'horizon; lorsque le fil est à l'est (*fig.* 360) le pôle nord est élevé, et il est abaissé lorsque le fil est à l'ouest (*fig.* 361). Le courant qui existe dans la pile agit sur l'aiguille aimantée comme celui qui traverse le fil conducteur.

592. M. Ampère en analysant la découverte de M. Œrsted, la réduisit à ces deux faits principaux : 1° le courant électrique tend à amener l'aiguille dans une direction perpendiculaire à la sienne, et si elle reste ordinairement inclinée, c'est par l'influence du magnétisme terrestre; aussi en équilibrant la force directrice du globe par un aimant convenablement placé, on en disposant l'aiguille dans un plan perpendiculaire à la direction de l'axe magnétique de la terre, l'aiguille se dirige toujours perpendiculairement au fil conducteur; 2° en supposant le courant dirigé du sud au nord, et l'observateur placé dans ce courant la tête au nord et la face tournée vers l'aiguille, la déviation de l'aiguille a toujours lieu à gauche de l'observateur.

593. M. Biot chercha la loi des actions d'un fil conducteur sur l'aiguille aimantée, en faisant osciller une boussole horizontale, soustraite à l'action directrice de la terre, à différentes distances d'un fil conducteur et sous différentes inclinaisons du fil : la durée des oscillations donnait les intensités de la force, comme les oscillations d'un pendule donnent l'intensité de la pesanteur; il parvint à ces deux résultats : 1° l'attraction exercée par chaque élément infiniment petit du fil, est en raison inverse du carré de la distance; 2° l'attraction pour chaque élément est proportionnelle au sinus de l'angle formé par la direction du fil avec la ligne qui joint ce point au pôle de l'aimant; ce dernier résultat fait voir que les attractions dont il s'agit se composent comme les forces en statique.

594. *Action des Fils Conducteurs, à travers lesquels passent des Courans Électriques.* M. Ampère fit, bientôt après les travaux de M. Œrsted, une découverte importante qui donna l'explication du fait observé par ce physicien et d'un grand nombre d'autres qui furent reconnus ensuite, et qui présente le magnétisme sous un nouveau point de vue.

595. En approchant l'un de l'autre deux fils conducteurs rectilignes, dont l'un était mobile, et à travers lesquels passaient des courans électriques dans le même sens ou en sens contraire, émanant d'une même pile ou de deux piles différentes, M. Ampère reconnut que les fils s'attiraient lorsque les courans allaient dans le même sens, et qu'ils se repoussaient lorsque les courans étaient dirigés en sens contraire. Les mêmes attractions avaient encore lieu lorsque les conducteurs étaient inclinés; l'action était attractive quand les courans allaient ensemble en s'approchant ou en s'éloignant du sommet de l'angle, et répulsive dans le cas contraire.

596. M. Ampère, en considérant que les aimans fixes agissent sur les fils conducteurs mobiles, soupçonna que le magnétisme terrestre devrait diriger perpendiculairement à son axe les fils conducteurs mobiles. Cette conjecture fut pleinement confirmée par l'expérience. Un courant vertical, mobile autour d'un axe vertical, est porté par l'action du globe à l'est de cet axe lorsque le courant descend dans le conducteur mobile, et à l'ouest du même axe lorsqu'il va en montant; dans les deux cas, le plan passe par l'axe, et le conducteur est amené dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. Un courant horizontal mobile qui ne peut se mouvoir que parallèlement à lui-même, est repoussé vers le nord ou vers le sud, suivant que le courant va de l'ouest à l'est ou de l'est à l'ouest. Lorsqu'un conducteur formant un circuit plan et presque fermé est mobile autour d'un axe, il se dirige par l'action du globe dans un plan perpendiculaire au méridien. Un semblable circuit mobile autour d'un axe qui passe par son centre de gravité, amené dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, se dirige perpendiculairement à la ligne d'inclinaison. Un conducteur horizontal, mobile autour d'un axe vertical

qui passe par une de ses extrémités, tourne par l'action de la terre d'un mouvement continu dans le sens est, sud, ouest, nord, si le courant va de la circonférence au centre, et en sens contraire, si le courant va du centre à la circonférence. Enfin, si on dispose un conducteur en spirale, il se dirigera comme une aiguille aimantée; et deux spirales semblables agissent l'une sur l'autre comme deux aimans. Nous donnerons plus tard une description détaillée des appareils employés pour vérifier ces faits.

597. Tous les phénomènes que nous venons de décrire entre les courans et les aimans et entre les courans et le magnétisme terrestre, conduisent à regarder l'effet magnétique du globe terrestre comme dû à une série de courans électriques qui se meuvent perpendiculairement au méridien magnétique, et les aimans comme formés de courans qui se meuvent dans des plans perpendiculaires à leur axe magnétique ou autour des molécules. Nous allons faire voir que cette hypothèse qui est si naturelle, surtout d'après le phénomène que présentent les conducteurs en spirale, satisfait à toutes les observations que nous avons indiquées.

Dans cette hypothèse, tout est réduit à l'effet des courans; M. Ampère en a découvert les lois, et a déterminé les formules générales qui représentent leur action : mais ne pouvant pas le suivre dans un ouvrage de la nature de celui-ci, nous nous contenterons de déduire des faits observés et la nature et le sens des actions des courans dans certains cas particuliers qui se rapportent aux faits que nous avons énoncés; nous donnerons ensuite un exposé plus détaillé de la théorie de M. Ampère, et nous terminerons par la description de quelques appareils électro-dynamiques.

598. Nous avons dit que deux conducteurs parallèles s'attiraient si les courans étaient dirigés dans le même sens, et se repoussaient si les courans étaient dirigés en sens contraire; nous avons vu aussi que quand les conducteurs étaient inclinés, il y avait attraction si les deux courans s'éloignaient ou se rapprochaient ensemble du sommet de l'angle, et répulsion dans le cas contraire (595). Lorsque les deux courans sont placés dans des plans différens, le même phénomène a encore lieu, mais il faut considérer la ligne qui mesure la plus courte distance des deux courans, comme le sommet de l'angle. Ces faits sont le résultat de l'observation et peuvent se déduire de l'action de deux élémens infiniment petits des deux courans, en les décomposant en deux ou trois autres infiniment petits, comme on décompose les forces en Statique. Ce principe est une conséquence de ce qu'un conducteur sinueux, de quelque forme qu'il soit, exerce sur un conducteur mobile rectiligne une action égale à celle d'un conducteur rectiligne, parallèle à son plan, de même longueur et traversé dans le même sens par un courant d'une égale intensité; car il résulte de ce fait, que si l'on décompose chaque portion infini-

ment petite du conducteur sinueux en deux élémens, l'un parallèle au conducteur rectiligne, l'autre perpendiculaire, ces derniers étant deux à deux égaux et opposés, leur somme sera nulle, et celle des composantes parallèles sera égale au conducteur rectiligne; or comme ce sont ces dernières seules qui agissent, il s'ensuit que l'effet de chaque portion infiniment petite d'un courant est équivalente à celle de ses composantes; cela posé:

599. Soit A B et C D (*fig.* 362) deux conducteurs rectilignes indéfinis, situés dans le même plan; il est évident, d'après ce qui précède, que les portions A O et C O, B O et O D se repoussent, tandis que les portions A O et O D, C O et B O s'attirent; par conséquent, si l'un d'eux est mobile, quatre forces conspireront à rendre les lignes A B et C D parallèles, et les courans dans le même sens.

600. Si l'on considère les deux courans contraires A B et B C (*fig.* 363), finis au point B, ils se repousserunt mutuellement, et cela quel que soit l'angle A B C; par conséquent, la répulsion aura encore lieu quand l'angle A B C sera de 180°; mais alors ils ne formeront qu'un seul et même courant; donc les différentes parties d'un même courant se repoussent.

601. Soit M N (*fig.* 364) un courant indéfini, A C un conducteur fini, mobile autour du point B et renfermant deux courans dirigés vers le point B : il est évident, d'après ce qui précède, que A B sera attiré et B C sera repoussé. A C tournera donc autour du point B; tant que A B n'aura pas dépassé la perpendiculaire B D sur M N, la même action aura lieu; mais quand il sera dans la position A' B, il sera repoussé par la partie du courant située du côté de M, et attiré par la partie du courant située du côté de N, et ce sera le contraire pour C' B; il est facile de déduire de là que le conducteur A C prendra un mouvement de rotation continu autour du point B dans le sens du courant M N. Si les courans de A C partaient du point B (*fig.* 365), il est évident que le mouvement de rotation serait en sens contraire. Il est facile de voir aussi que la force qui produit la rotation serait constante, si M N était situé à une très-grande distance relativement à la longueur A C, ou si ce conducteur était courbé en cercle ayant le point B pour centre.

602. Soit A B et C D (*fig.* 366) deux conducteurs situés dans des plans différens et *m n* leur plus courte distance : il est évident, d'après ce qui précède, que si un des courans est fixe et l'autre mobile autour du point *m*, ce dernier tournera parallèlement au premier, de manière que les courans soient dans le même sens.

603. Si un conducteur vertical fini A B était placé au-dessus et derrière un conducteur horizontal indéfini M N (*fig.* 367), je dis que le conducteur A B ne pouvant se mouvoir qu'horizontalement, il se mouvra dans un plan parallèle à M N. En effet, soit

P Q la plus courte distance des deux droites; en supposant que le courant soit descendant, il est évident que l'action de la partie M P sera répulsive, et celle de la partie P N attractive; si on prend deux points *m* et *n* également éloignés du point P, leur action sur un point *a* de A B pourra être représentée par les lignes *x*, *y*, et comme ces forces sont égales, leur résultante *z* sera parallèle à M N; par conséquent, le conducteur A B se mouvra parallèlement à M N. Il est facile de voir que si le courant était ascendant dans le conducteur, le mouvement aurait toujours lieu parallèlement à M N, mais en sens contraire (*fig.* 368). Cet effet est dû 1° à ce que le conducteur A B n'est pas prolongé au delà de P Q, car la partie qui serait située au-dessous serait douée d'un mouvement contraire; 2° à ce qu'il ne peut pas obéir à des forces qui le feraient basculer. Il est facile d'après cela d'expliquer tous les phénomènes décrits.

604. En effet, nous avons considéré la terre comme renfermant des courans dirigés de l'est à l'ouest, et principalement accumulés vers l'équateur, et un aimant comme renfermant dans chaque tranche perpendiculaire à son axe, des courans dirigés dans le même sens. Si une aiguille aimantée est abandonnée à elle-même, elle se dirigera nécessairement de manière que les plans de ses courans et ceux du globe soient parallèles et que les courans les plus voisins, c'est-à-dire ceux de la surface du globe où est placée l'aiguille et ceux de la partie inférieure de l'aiguille, soient dirigés dans le même sens. Ainsi sur la face inférieure de l'aiguille les courans vont de l'est à l'ouest, sur la face supérieure de l'ouest à l'est; ils sont ascendans sur la face ouest, et descendans sur la face est. La fig. 369 représente cette disposition. Alors, si l'on place parallèlement à l'axe et au-dessus de l'aiguille un conducteur dont le courant soit dirigé du sud au nord (*fig.* 370), les courans de la partie supérieure de l'aiguille étant dirigés de l'ouest à l'est seront attirés vers le courant, et l'aiguille déclinera vers l'est. Si on met le conducteur au-dessous de l'aiguille, les courans en regard du conducteur étant dirigés de l'est à l'ouest (*fig.* 271), il est évident que l'aiguille devra être déviée vers l'ouest; si on place l'aiguille dans le même plan horizontal et à l'ouest, les courans de cette face étant ascendans, la pôle nord de l'aiguille sera abaissé, et le fil étant placé du côté opposé, il sera élevé.

605. Si un conducteur vertical A B (*fig.* 372), dans lequel le courant est descendant, peut tourner autour de l'axe C D et se trouve soumis à l'influence d'un courant M N dirigé de l'est à l'ouest, il devra se porter en sens contraire du courant, l'appareil tournera et restera en équilibre lorsque le plan étant parallèle à M N, A B se trouvera à l'est de l'axe : si le courant était ascendant, A B se fixerait à l'ouest (603); par conséquent, si l'on fixe sur une pointe l'appareil (*fig.* 373) composé de deux conducteurs A B et C D, séparés par un corps isolant mobile



sur la pointe *o*, en faisant passer dans ces deux conducteurs des courans ascendans ou descendans, l'appareil sollicité par le courant de la terre de l'est à l'ouest restera indifféremment dans tous les azimuts, car les deux conducteurs A B et C D tendent également à se rendre à l'est ou à l'ouest du point *o*, suivant que le courant est descendant ou ascendant; mais si les deux courans sont en sens contraire, le plan de l'appareil se fixera parallèlement à M N, de manière que le courant ascendant soit à l'ouest et le courant descendant à l'est. Si un conducteur A B (*fig.* 364) peut tourner autour de son centre, de manière que le courant soit dans le même sens, il est évident que, par l'action du magnétisme terrestre, il devra se diriger perpendiculairement au méridien magnétique; mais si à partir du point B les courans sont en sens contraire (*fig.* 364, 365), le conducteur A C devra tourner d'une manière continue autour du point B (601).

606. Nous avons dit que M. Ampère avait imité les aimans avec des conducteurs tournés en spirale (*fig.* 375); il est évident que ce conducteur agit comme une série de conducteurs circulaires, plus un conducteur rectiligne égal à la longueur de la spirale; par conséquent, en faisant revenir le fil par le centre de la spire, ce retour détruira la seconde composante du courant, qui agira alors exactement comme une suite d'anneaux circulaires dans lesquels les courans seraient dans le même sens. Cet appareil se dirige comme une aiguille aimantée, et possède des pôles comme elle; en changeant la direction de la spirale en un ou plusieurs points, on obtient des pôles intermédiaires analogues aux points conséquens. Tous les autres phénomènes magnétiques s'expliquent avec une extrême facilité, en regardant les aimans comme formés de tranches parallèles renfermant des courans électriques dirigés dans le même sens. Enfin, pour compléter l'analogie des courans et des aimans, nous rappellerons la belle expérience de M. Arago : il avait remarqué que les conducteurs attiraient la limaille de fer et d'acier, et communiquaient à ce dernier un magnétisme durable; en introduisant une aiguille d'acier dans l'hélice d'un fil conducteur, il obtint des aimans dont les pôles se renversaient en changeant la direction de l'aiguille, et en intervertissant le sens de l'hélice en plusieurs points, l'aiguille obtenait autant de points conséquens.

607. On voit, d'après ce qui précède, que tous les phénomènes magnétiques s'expliqueraient avec un extrême facilité au moyen de l'action des courans électriques; nous regrettons que les bornes de cet ouvrage ne nous permettent pas de développer la théorie de M. Ampère; mais nous ne pouvons nous dispenser de donner quelques détails sur les points principaux de cette belle théorie. M. Ampère, après avoir trouvé l'expression de l'action de deux portions infiniment petites de deux courans, déduit du calcul, 1° l'action d'une portion infiniment petite d'un courant, sur un courant fermé ou indéfini, sur un courant circulaire fermé, sur un système de cou-

rans circulaires dont les plans sont perpendiculaires à la ligne qui passe par leurs centres, et qu'il désigne sous le nom de *Solénoïde ;* 2° l'action mutuelle d'un solénoïde et d'un système quelconque de courans formant des circuits fermés ou indéfinis dans les deux sens. De ces formules il résulte, 1° que l'action d'un solénoïde homogène (c'est-à-dire, dont les courans circulaires sont de même grandeur, de même intensité et équidistans) et indéfini dans les deux sens, ou dont l'axe est une courbe fermée, sur un élément quelconque de courant, est nulle ; 2° que la résultante de l'action d'un solénoïde qui ne s'étend à l'infini que dans un sens, passe par l'origine du solénoïde ; 3° que l'action de deux solénoïdes finis donne naissance à quatre forces qui passent par les extrémités des deux systèmes ; 4° que quand un solénoïde, dont l'axe est une courbe fermée, n'est pas homogène, il peut être remplacé par un solénoïde homogène dont l'intensité serait égale à celle du courant qui en a le moins, et par plusieurs solénoïdes homogènes et finis.

Toutes ces conséquences déduites du calcul ont été complètement confirmées par l'observation, et les dernières permettent de concevoir la constitution des aimans et les circonstances qui accompagnent le développement du magnétisme. M. Ampère considère chaque molécule d'un corps susceptible de recevoir l'influence magnétique, comme une petite pile de Volta, dont les courans se rejoignent à travers l'espace environnant ; il en résulte alors un solénoïde fermé, qui doit être homogène quand le corps ne jouit d'aucune vertu magnétique, car un tel assemblage de courans n'exerce aucune action sur un élément quelconque de courant situé dans le corps ou à l'extérieur ; mais si des courans d'une grande intensité, disposés d'une autre manière, viennent à agir sur eux, l'homogénité des solénoïdes disparaîtra, et leurs actions étant alors équivalentes à celles de petits solénoïdes finis, qui exercent à leurs extrémités des actions contraires, ils agiront comme les élémens magnétiques de M. Poisson (1542) ; dans l'état d'équilibre, la résultante de leur action sur un élément quelconque de courant du corps devra être nulle, puisque sans cela la disposition de ce courant serait changée ; il en résulte alors que ces solénoïdes agiront comme les élémens magnétiques en question, et que toutes les considérations sur lesquelles M. Poisson a établi sa belle théorie du magnétisme sont applicables à l'hypothèse de M. Ampère. La cause du magnétisme terrestre serait alors facile à concevoir ; les courans seraient développés dans le globe et par le contact des substances étrangères et par les variations de température.

608. Dans ce qui précède, nous avons parlé des conducteurs renfermant des courans dans des directions déterminées et mobiles dans certains sens, sans indiquer de quelle manière on parvenait à remplir ces conditions ; il nous reste maintenant à décrire les principaux appareils qui ont été employés.

609. *Appareils Électro-magnétiques.* Les piles les plus propres à produire les



phénomènes dont il est question, sont celles qui ne sont formées que d'un petit nombre de couples de grandes dimensions, parce que les courans se meuvent plus facilement (590). Pour reconnaître l'action répulsive et attractive des courans parallèles, on se sert de l'appareil (*fig.* 376); il est composé d'un conducteur fixe A B et d'un conducteur mobile E C D F scellé à un tube de verre E F, suspendu par des pointes d'acier dans deux petites capsules de platine X et Y pleines de mercure, et supportées par des tiges métalliques P et Q; H V est un corps destiné à équilibrer l'appareil de manière à ce qu'il puisse librement tourner autour des pointes; quatre petits vases de buis S, R, T, U, pleins de mercure, communiquent par des fils, savoir : R et T avec les supports de A B, S et U avec ceux du conducteur E C D F; ils portent le nom de Rhéophores, et sont destinés en outre à recevoir les extrémités des fils qui partent des pôles pour transmettre le courant dans les conducteurs. Pour obtenir des courans dans le même sens, on établit d'abord une communication entre les extrémités opposées des deux conducteurs, en faisant passer sous le cadre de l'appareil un fil de laiton dont on fait plonger les extrémités dans les coupes opposées R et U, ou S et T; on plonge ensuite les fils communiquant avec les extrémités de la pile dans les autres vases. Supposons, par exemple, que R et U soient en communication, et qu'on fasse arriver le fil positif en S, le courant suivra la direction P E C D F Q U R A B T; les courans, dans A B et dans C D, seront dans le même sens, et par conséquent il y aura attraction. Si l'on voulait avoir les courans en sens contraire, il faudrait faire communiquer les deux vases situés d'un même côté, par exemple U avec T, et mettre S en contact avec le pôle positif, et R avec le pôle négatif, le courant suivrait la direction S P E C D F Q U T B A R; on reconnaîtrait qu'alors il y aurait répulsion.

610. Lorsqu'on veut observer les mouvemens des conducteurs mobiles autour d'un axe vertical, on emploie le mode de suspension très-commode représenté (*fig.* 377); il est formé de deux tiges de cuivre parallèles, maintenues à distance dans une pièce de bois ou de verre Q; ces deux tiges sont terminées supérieurement et inférieurement par deux petites capsules de platine; les capsules supérieures sont destinées à recevoir les fils qui communiquent avec la pile; celles qui sont inférieures doivent être placées dans la même verticale, et sont destinées à recevoir les pointes du conducteur mobile. Pour observer l'action directrice de la terre, on suspend le conducteur (*fig.* 378 ou 379). Mais si l'on veut observer l'action de deux courans inclinés, il faut employer un conducteur mobile sur lequel l'action du globe soit nulle. Ces conducteurs peuvent beaucoup varier dans leur forme; car il suffit, pour que la condition soit remplie, que le conducteur offre deux courans dans chaque direction; les figures 280 et 281 représentent les plus simples. Aux points où les conducteurs se croisent, ils sont séparés par des fils de soie tournés

sur chacun d'eux; les flèches indiquent la direction des courans. Par une disposition analogue à celle de la figure 376, on pourra, au moyen de la même pile, faire passer des courans dans le conducteur fixe et dans les conducteurs mobiles, de manière à observer les attractions et les répulsions dont nous avons parlé. Pour obtenir un mouvement de rotation par l'action du globe, on emploie l'appareil (*fig.* 382), qui est composé d'un vase circulaire percé d'une ouverture *o* garnie d'un rebord; à travers cette ouverture s'élève une tige terminée par une petite capsule, dans laquelle repose le conducteur A B C; on remplit le vase d'eau acidulée; on met la tige *z* en contact avec le pôle positif, et le vase cylindrique avec le pôle négatif; le courant se déverse de chaque côté du point A, et l'appareil se meut avec un mouvement continu; car les portions verticales du conducteur renfermant des courans dans la même direction, la force directrice de la terre qui tend à les amener tous deux à l'ouest, est nulle, et il ne reste que l'action des parties horizontales qui sont sollicitées comme dans la figure 265.

611. Pour imiter les aimans, on dispose un fil de cuivre comme dans la fig. 383. Le fil conducteur qui part du point *x* descend, se dirige à l'est, revient en formant la spire, retourne par son centre et remonte en *y*. Il est bon de faire cet appareil avec un fil de cuivre couvert de soie. Cet appareil se comporte exactement comme un aimant. Pour le rendre insensible à l'action du globe, on le dispose comme dans la figure 384; les mouvemens du courant étant symétriques par rapport à l'axe de rotation, l'influence de la terre est nulle; mais les spirales extrêmes exercent une action très-énergique sur les aimans qui en sont à une petite distance.

612. M. Ampère a construit un grand nombre d'autres appareils extrêmement ingénieux pour produire des mouvemens de rotation continus par l'action des courans circulaires des aimans, mais nous ne pouvons les décrire tous; nous renvoyons à un Mémoire que ce savant physicien a publié en 1826, et qui contient la description d'un appareil très-commode, à l'aide duquel on peut faire toutes les expériences électro-dynamiques.

613. Nous terminerons par la description d'un appareil au moyen duquel on peut reconnaître la présence des plus faibles courans électriques. Cet appareil (*fig.* 385), dû à M. Schweiger de Halle, porte le nom de Multiplicateur; il est fondé sur ce qu'un conducteur à travers lequel passe un courant électrique, exerce une action sur toute sa longueur. C C sont deux montans en bois qui portent un châssis B, sur le bord duquel sont des rainures qui reçoivent un fil enveloppé de soie qui s'enroule comme sur une bobine; E F est un fil de cocon qui entre librement dans un cylindre traversant les fils supérieurs; à son extrémité se trouve un petit étrier en papier qui porte une aiguille aimantée, parallèlement à un cadran divisé; il est évident

qu'en mettant les extrémités X et Y du fil en contact avec un appareil quelconque qui développe des courans électriques, l'aiguille sera déviée par l'ensemble des fils supérieurs et inférieurs, qui, renfermant des courans en sens contraire, produiront des effets qui tendront tous à faire dévier l'aiguille dans le même sens. L'appareil doit être dirigé de manière que le plan des fils soit dans le méridien magnétique. Au moyen de cet appareil, on est parvenu à reconnaître l'existence des courans électriques dans un grand nombre de circonstances, où l'on n'avait pu encore la constater. M. Becquerel a trouvé que pour des écarts plus petits que 30°, l'action exercée par le courant était proportionnelle à l'angle de déviation. C'est en employant un mode de suspension semblable à celui de la balance de Coulomb, et en ramenant l'aiguille dans le méridien magnétique par la torsion du micromètre supérieur, que M. Becquerel est parvenu à ce résultat.

Développement de l'Electricité dans les Actions Chimiques.

614. D'après les expériences de M. Davy, il paraissait établi que deux corps qui vont se combiner, commencent d'abord par se constituer dans deux états électriques opposés, et que ces états électriques augmentant jusqu'au moment de la combinaison, il y avait à cet instant neutralisation des électricités, d'où résultait l'élévation de température. M. Becquerel a reconnu que le premier fait était exact, mais que le développement de l'électricité continuait pendant toute la durée de l'action chimique, que l'électricité développée n'était sensible au condensateur que quand l'action chimique était très-faible, et que si l'action chimique était très-énergique, l'électricité ne pouvait être appréciée qu'au moyen du multiplicateur de Schweiger. Après une suite nombreuse d'expériences, M. Becquerel a reconnu les faits suivans :

1° Dans l'action des acides sur les alcalis, l'acide dégage du fluide positif et l'alcali du fluide négatif. 2° Dans l'action d'un métal sur un acide, ce dernier prend l'électricité négative ou positive suivant qu'il est concentré ou étendu d'eau. 3° Les acides concentrés agissent sur les dissolutions acides plus faibles et sur l'eau comme sur les alcalis. 4° L'eau, par rapport à un alcali, se comporte comme un acide. 5° Dans la combustion du papier et de l'alcool, la flamme prend l'électricité négative, et le corps combustible l'électricité positive. 6° Dans les mélanges de sels neutres, la direction du courant électrique varie. 7° On exalte beaucoup les propriétés électriques de l'or et du platine lorsqu'on les a soumis à une haute température, ou lorsqu'on les plonge dans l'acide nitrique, et qu'on les lave ensuite; nous avons vu (Cours de Chimie, 1088) que ces mêmes circonstances favorisent l'action des mêmes métaux sur les

mélange d'oxigène et d'hydrogène. 8° Et qu'enfin, dans un grand nombre de cas, l'électricité développée dans l'action chimique est contraire à celle qui se manifeste par le simple contact.

615. Depuis long-temps on a essayé de rendre compte des affinités chimiques par les actions électriques. M. Davy admet, qu'avant la combinaison les corps se constituent dans deux états électriques opposés, qu'il y a neutralisation par la combinaison, et que la chaleur et la lumière qui accompagnent souvent la combustion proviennent de cette neutralisation. M. Berzélius suppose que les molécules ont une polarité électrique comme les plus petits fragmens d'une tourmaline, que dans chaque corps les molécules ont un pôle plus énergique que l'autre, et que c'est à l'énergie des pôles et à la nature de leur électricité que sont dues les affinités chimiques; M. Berzélius admet aussi, comme M. Davy, que dans la combinaison il y a neutralisation des électricités. Mais ces hypothèses ne rendent point compte de la permanence de la combinaison et n'expliquent point pourquoi, dans l'action chimique, les corps développent souvent une électricité contraire à celle que fournit le simple contact. L'hypothèse émise par M. Ampère satisfait à toutes ces conditions, et paraît par conséquent beaucoup plus probable.

M. Ampère admet 1° que les molécules des corps sont dans un état électrique permanent; 2° que l'électricité ne peut pas s'en dégager; 3° que le fluide renfermé dans les molécules décompose le fluide environnant qui forme alors autour de chacune d'elles une atmosphère électrique de nature contraire. L'oxigène et tous les corps qui ont une tendance acide sont à l'état négatif et environnés d'une atmosphère positive, tandis que l'hydrogène et les alcalis sont positifs et entourés d'une couche électrique négative. Il résulte de là, que quand deux métaux sont en contact, le fluide électrique qui entoure leurs particules étant de nature contraire dans chacun d'eux et en général dans des proportions différentes, à cause de la nature différente des métaux, les atmosphères des particules se combineront en partie; les électricités propres des particules cesseront alors d'être dissimulées et manifesteront leurs propriétés. Supposons que le zinc et le cuivre soient en contact entre eux et avec les deux extrémités d'un fil conducteur dont on puisse négliger l'action électro-motrice: le cuivre, qui est à l'état électro-négatif par rapport au zinc, attirera l'électricité positive du fil et repoussera l'autre qui sera attirée par le zinc en suivant le circuit; les électricités du fil viendront reformer, autour des particules du zinc et du cuivre, des atmosphères semblables à celles qui existaient avant le contact; mais elles se détruiront de nouveau, et les mêmes effets en se reproduisant, formeront un double courant dans le circuit. Si on met en contact un acide et un alcali sans qu'il y ait combinaison, le même raisonnement fait voir qu'il y aura un courant qui ira de l'acide à l'alcali, puisque l'acide est négatif et l'alcali positif;

mais s'il y a combinaison, les deux atmosphères électriques se combineront dans le liquide et produiront une élévation de température; cependant, si l'acide et l'alcali étaient en contact avec leur fil conducteur, une partie des atmosphères électriques suivrait le fil pour s'y réunir, et il en résulterait un courant inverse de celui qu'on observe dans le simple contact. Pour expliquer la différence de nature de l'électricité dégagée par un métal en contact avec un acide faible ou concentré, M. Ampère considère que si le liquide est très-bon conducteur, ce qui a toujours lieu pour les acides très-concentrés, il pourra arriver que les atmosphères se recombinent plus vite que ne font les particules matérielles, à cause de leur inertie; les particules se trouvent alors, pendant un temps très-court, comme s'il n'y avait pas eu combinaison, et comme il y a continuité dans ce mode d'action, il s'ensuit que l'acide concentré doit fournir de l'électricité négative, et de l'électricité positive quand il est étendu. Enfin, pour expliquer comment il se fait qu'un même corps joue tantôt le rôle de corps positif, tantôt le rôle de corps négatif, M. Ampère admet que les particules matérielles, indépendamment du fluide libre, renferment du fluide neutre, et que quand deux particules électro-positives se trouvent dans la sphère d'activité l'une de l'autre, dans chacune il y a décomposition de fluide neutre, et celle qui sera le moins positive se comportera comme un élément électro-négatif : on observe alors des phénomènes semblables à ceux que présente l'électricité ordinaire, quand l'attraction se change en répulsion (489); l'explication de ce dernier fait serait beaucoup plus simple si on admettait l'hypothèse de la polarité des molécules en même temps que les atmosphères électriques; cette hypothèse est d'ailleurs appuyée sur un grand nombre de phénomènes où elle se manifeste d'une manière évidente, par exemple, dans les cristaux électriques par la chaleur (528), les lames séparées par le clivage.

616. Nous terminerons ces considérations générales par l'explication d'un phénomène très-remarquable découvert par M. Davy.

Ce célèbre chimiste a trouvé qu'un morceau de zinc gros comme un pois était suffisant pour conserver intact dans l'eau de mer 40 ou 50 pouces carrés de cuivre; et il en a déduit un procédé très-simple pour conserver le doublage des navires. L'explication donnée par M. Davy est celle-ci : le cuivre est un métal faiblement électro-positif, il ne doit donc agir sur l'eau de mer que lorsqu'il est dans un état positif; par conséquent, si on le rendait faiblement négatif, l'action corrosive de l'eau de mer sur lui serait nulle. Cette explication exige une petite modification pour cadrer avec les faits, car M. Becquerel a trouvé que le cuivre avec l'eau de mer s'électrise négativement; mais comme il y a une action chimique, très-faible à la vérité, et qu'alors les effets sont inverses de ceux qui auraient lieu s'il y avait simple contact, il s'ensuit que les molécules de cuivre sont réellement électro-positives relativement à celles de l'eau de mer, et doivent fournir de l'électricité

négative au condensateur, suivant la théorie de M. Ampère. Or en touchant le cuivre avec le zinc, il devient négatif, et il y a répulsion sur les molécules de l'eau de mer.

Par des expériences postérieures, M. Davy a reconnu que quand le cuivre était protégé par une quantité de zinc, de fer, ou de fonte équivalente à $1/40$ ou à $1/150$ de celle de cuivre, l'action de l'eau de mer était nulle; par une plus petite quantité de ces derniers métaux, l'action est sensible; par une plus grande qnantité de métal protecteur, il se dépose sur le cuivre du carbonate de chaux, des sels de magnésie, et les plantes et les animaux s'y attachent.

M. Pepys a employé le même principe pour conserver des instrumens de chirurgie en les enfermant dans des boîtes doublées en zinc.

RÉSUMÉ DU CHAPITRE IV.

Électricité développée par le Contact.

En 1789, Galvani rrconnut qu'en touchant les muscles et les nerfs d'un cadavre de grenouille avec un arc composé de deux métaux différens, ces organes éprouvaient de violentes commotions. Il crut que la cause de ce phénomène résidait dans l'électricité que possédaient naturellement les muscles et les nerfs. Volta démontra que l'électririté était développée par le rontart des deux métaux.

Deux métaux isolés se constituent par leur contact dans deux états électriques opposés, appréciables au condensateur, en y accumulant l'élertricité développée dans plusieurs contacts. Lorsque deux métaux sont soudés, et qua l'un est en communication avec le sol, l'autre charge instantanément le condensateur, par un contart immédiat, si le plateau est du même métal, ou par l'interposition d'un corps humide, s'il est de nature différente. Tous les corps jouissent comme lrs métaux de la faculté de s'électriser par le contact, mais leur faculté électro-motrice est beaucoup plus faible.

Piles Voltaïques. Elles sont formées de séries de couples de deux métaux différens, ordinairement cuivre et zinc séparés par un corps liquida bon conducteur, par un acide très-affaibli ou une dissolution saline. En supposant que la différenra de trosion entre lrs métaux d'un même couple est rnostante, que la faculté électro-motrice du condurtrur humide est nulle, et que ce liquide est un conducteur parfait, on trouve que quand la pile est en contact avec le sol par une de ses extrémités, ella ne renferme qu'una senle espèce d'électririté qui crott en progression arithmétique dans les couples, à partir de relui qui communique avec le sol, et que dans une pile isolée, les drux moitiés renferment des espèces différentes d'élertricité, qui rroissent dans chaque couple à partir du rentre. *Piles à colonne*, *piles à auges*, *piles de Wolaston*, *piles sèches*, *piles à un seul couple*, *piles de Ritter.* Les courans peuvent aussi s'établir, par l'inégalité de température, dans un circuit fermé composé d'un seul métal ou de plusieurs métaux différens.

Effet des Piles Voltaïques. Ces effets sont de deux espèrrs, rrux qui proviennant de la tension et ceux qui résultent des courans élertriques qui s'établissent lorsque l'on met les deux pôlrs en contact par un corps plus ou moins bon conductenr.

Effets de la Tension.

Ces effets sont de chargrr un condensateur des batteries électriques; les piles sèches rhargent instantanément le condensateur. La tension est proportionnelle au nombre des couples et indé-

pendante de leur grandeur. Au moyen des piles, M. Ermann a reconnu qua la faculté conductrice de certains corps n'est pas la même pour les deux fluides. — Électromètre condensateur de Bohnenberger — Diagomètre de M. Rousseau.

Effets des Courans.

Ignition et Fusion des Corps. Lorsqu'on met les extrémités d'une pile en contact par un fil conducteur très-délié, on obtient des phénomènes semblables à ceux des décharges du condensateur ou des batteries électriques, at qui sont produits par les mêmes causes. En employant des piles composées d'un grand nombre de couples, at terminant les fils des pôles par de petits cônes da charbon peu distans, il se forme antre eux un jet lumineux dont la chaleur est axcessivament élevée; ce phénomène a lieu dans la vide comma dans l'air.

Effets Chimiques. Lorsqu'on plonga les deux fils de platine des pôles d'une pile dans un liquide conducteur, les élémens de l'eau, da l'acide, du sel ou da l'alcali sont décomposés. La décomposition a lieu à chaque pôle, chaque courant entraîne avec lui les molécules pour lesquelles il a le plus d'affinité, at les dépose sur la pramier conducteur solide qu'il ast obligé de traverser, at dans lequel il ne paut pas charrier ces molécules; l'oxigène at les acides se réunissent au pôle positif, et l'hydrogène, les alcalis et les bases au pôle négatif. Les molécules entraînées par les courans, peuvent traverser des dissolutions renfermant des corps ayant une grande affinité pour elles, sans qu'il y ait combinaison, axcepté pourtant la cas où il pourrait se former un corps insoluble. Les effats chimiques exigent des piles composées d'un grand nombre da paires, parce que les liquides sont des conducteurs imparfaits, et que les courans ont d'autant plus de facilité à les traverser, qu'ils en ont déjà traversé un plus grand nombre dans la pile. Les effets chimiques peuvent se développer dans un circuit fermé, lorsque les parties des deux métaux an contact sont plongés dans le liquide; le courant s'établit dans la liquida environnant.

Effets des Courans sur l'aiguille aimantée. En appelant direction du courant cella du fluide positif, ce dernier ayant lieu du sud au nord, et l'observateur étant censé dans le courant les pieds au sud et la faca tournée vers l'aiguille, cette dernière est toujours déviée à la gauche de l'observataur. L'aiguilla soustraite à l'influence directrice da la terre, se mat à angla droit avac le courant. L'action da chaque élément d'un courant sur un aimant est en raison inverse du carré de la distance, et proportionnalle au sinus de l'angle formé par la direction du courant avec la ligna qui joint cet élément avec le pôla de l'aimant.

Actions des Courans les uns sur les autres. Les courans qui passent à travers des conducteurs parallèles et qui ne peuvant se mouvoir qua parallèlement, s'attirent quand ils sont dirigés dans le même sens, et se repoussent quand ils sont dirigés en sens contraire. Si las courans passent à travers des conducteurs indéfinis, dont l'un est mobila autour d'un de ses points, ce dernier tourne da maniere à devenir parallele au premier. Lorsque deux courans traversent deux conducteurs partant d'un point commun ou de deux points situés sur la plus courte distance des deux directions, les deux courans s'attirent s'ils vont tous deux en s'approchant ou en s'éloignant du sommat da l'angla, at se repoussent dans la cas contraire. Quand un courant indéfini agit sur un courant fini, perpendiculaire et situé au-dessus da lui, qui ne peut sa mouvoir que parallelement à lui-mêma, ce dernier se meut dans un plan parallèle au premier. Lorsqu'un conducteur rectiligne fini at mobila autour de son centre, qui renferme dans ses deux moitiés deux courans an sens contraire, est soumis à l'action d'un courant indéfini, parallèle à son plan, il éprouva un mouvament de rotation continu. Enfin, les différentes parties d'un mêma courant sa repoussent. Ces faits sont le résultat da l'observation et peuvent se déduiredu calcul, en considérant les actions de chaque élément des courans, at les décomposant comme les forces en statiqua; chaqua élément agit comme ses composantes, car l'action d'un conducteur sinueus est égale à celle d'un conducteur rectiligne, parallèle à son plan.

Action de la terre sur les Courans traversant des conducteurs mobiles. Cetta action est exactement cella qui aurait lieu si la terre renfarmait des courans dirigés de l'est à l'ouest, perpendiculaires au méridien magnétiqua.

Explication de l'action des Courans sur les Aimans, et de ces derniers entre eux. Les aimans se comportent comma si toutes les tranchas perpendiculaires à la ligna des pôles renfermaient des courans passant dans des courbes fermées. Un conductaur plié en hélica, et dont l'effat longitudinal des spires est détruit par le retour du fil conducteur par l'axe, se dirige comma

un aimant. Des aiguilles d'aciar placées dens un conducteur plié en hélice, à travers lequel on fait passer nn courant, prennent deux pôles; si le sens de l'hélice change plusieurs fois, l'aiguille ecquiert autent de points conséquans. M. Ampère désigna sous le nom da Solénoïde, un systèma de courans circulaires, dont les plans sont perpendiculaires à la ligne qui passe par les cantres, et de solénoïde homogène, celui dont les courans circulaires sont de mêma grandeur, da même intensité at équidistans. Ce savant a démontré que l'action d'un solénoïde indéfini, où dont l'exe est une courbe ferméa sur un élément de courant, est nulle; qua celle action pour un solénoïda fini d'un côté, passe par ce point; que s'il est d'une longueur finia, les résultantes des forces qui en émanent, passent par ses deux extrémités, et qua l'action du solénoïda hétérogène est équivalente à l'action d'un ou de plusieurs solénoïdes finis. M. Ampère considère chaque molécule d'un corps susceptible de recevoir l'influence magnétique, comme una petite pile de Volta, dont les courans se rejoignent dans l'espace environnant; il en résulte alors pour chacune d'elles un solénoïda homogène dont l'action est nulle; meis s'ils sont soumis à l'action d'un conrant extérieur, les solénoïdes deviennent hétérogènes, ils agisent comme un solénoïde fini, dont les actions opposées partent de ses extrémités; leurs actions sont alors identiques evec celles des élémens magnétiques de M. Poisson.

Développement de l'Électricité dans les Actions Chimiques.

Dens toutes les actions chimiques, il se développe de l'électricité; lorsque les actions sont faibles, la tension est sensibla et l'électricité peut se recueillir à l'aida du condensateur; dans le cas contraire, on peut la reconnaitre evec le multiplicateur. En général les courans qui se développent dans les actions chimiquas sont contraires à ceux qui résultent du simple contect: parmi les différentes hypothèses émises sur l'état électriqua des molécules, cella da M. Ampère a une bien plus grande probabilité que les eutres: elle consiste à considérer chaqne molécule comme étant dans un état électrique permanent, et na pouvant perdre, dans aucune circonstance, l'électricité libre qu'elle renferma; il se forme elors antour de chaque molécules una atmosphère électrique de nature contraire, qui dissimule l'électricité de la molécule. Dens cette hypothèse on explique très-facilement, 1° l'électricité développée par le contact; 2° celle qui provient des actions chimiques; 3° pourquoi cette dernière est souvent opposée à celle qui résulte du simple contact; 4° la permanence des combinaisons chimiques; 5° la chaleur qui accompagna toutes les combinaisons. Mais on n'explique pas aussi bien comment una mêma molécula joue tantôt le rôle positif, tantôt le rôle négatif. L'ensemble des phénomènes s'expliquerait aussi bien, et les derniers phénomènes se déduiraient facilement da cette hypothèse, si on admettait en même temps dans chaque molécule une polarité électrique, inégale pour chacune d'elles.

CHAPITRE V.

De la Lumière.

617. La lumière est la cause de la vision; plusieurs systèmes ont été émis sur sa nature: Descartes suppose que l'univers est rempli d'un fluide extrêmement subtil et élastique, désigné sous le nom d'Éther; que les corps lumineux éprouvent, par une cause quelconque, des vibrations qui se propagent à travers l'éther comme les ondes sonores à travers l'air, et que les effets produits sur l'œil sont analogues à ceux que les ondes sonores produisent sur l'organe de l'ouïe. Newton

admet, au contraire, que la lumière est due à une émission de particules que les corps lumineux lancent continuellement dans toutes les directions. Nous décrirons d'abord les phénomènes que présente la lumière, sans aucune hypothèse sur sa nature, et nous examinerons ensuite ces deux systèmes entre lesquels les physiciens sont encore partagés.

§ Ier.

Phénomènes Généraux.

Transmission.

618. *La Lumière se transmet en ligne droite.* En effet, si on fait pénétrer un petit faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, la poussière en suspension dans l'air étant éclairée, laisse apercevoir la route de la lumière, et on reconnalt facilement qu'elle est rectiligne. Si on interpose un corps opaque sur la ligne droite qui joint l'œil avec le corps lumineux, la lumière est interceptée.

619. *L'Intensité de la Lumière décroît comme le carré de la distance au point lumineux.* En effet, si on conçoit deux sphères de rayons différens, décrites autour du point lumineux, chacune recevra toute la lumière émanée du point lumineux; et, comme elles ont des surfaces inégales, il faut nécessairement qu'une même étendue, prise sur chacune d'elles, reçoive une quantité de lumière en raison inverse de l'étendue de la surface de la sphère sur laquelle elle est placée, c'est-à-dire, en raison inverse du carré de la distance au point lumineux.

620. La loi précédente n'est exacte que quand la lumière se meut dans le vide; lorsqu'elle passe à travers des milieux diaphanes, gazeux, liquides ou solides, une grande partie est absorbée. En ne considérant qu'un faisceau de rayons parallèles en mouvement dans un milieu homogène, Bouguer a conclu de ses expériences que l'intensité de la lumière décroissait à peu près en progression géométrique pour des couches croissant en progression arithmétique. Ce résultat peut se déduire d'une hypothèse très-simple, qui consiste à admettre que l'absorption de chaque couche supposée très-mince, est proportionnelle à son épaisseur et à la quantité de lumière qui la traverse.

621. *Mesure de l'Intensité de deux Lumières.* Pour estimer le rapport d'intensité de deux lumières, on place un corps opaque en avant d'un carton blanc éclairé par les deux lumières; chacune d'elles projette une ombre du corps sur le carton,

et chaque ombre est éclairée par l'antre lumière ; on change les distances relatives des deux lumières jusqu'à ce que les ombres aient la même teinte, alors les intensités des deux lumières sont évidemment en raison inverse du carré de leurs distances aux ombres qu'elles éclairent.

622. *Vitesse de la Lumière*. La vitesse de la lumière étant très-grande, on ne peut pas l'observer à la surface de la terre, parce que les distances y sont trop petites. La détermination de cette vitesse ne peut se faire que par des observations astronomiques. Jupiter est accompagné de plusieurs satellites qui circulent autour de lui; le premier effectue sa rotation dans 42 heures ½; par conséquent, si on observe l'instant où il s'éclipse en entrant dans le cône d'ombre que Jupiter projette derrière lui, l'instant de l'immersion apparente aura lieu après celui de l'immersion réelle, de tout le temps que la lumière met à parcourir la distance qui sépare Jupiter de la Terre. Si cette distance était constante, les éclipses se succéderaient à des intervalles exacts de 42 heures ½. Mais si la première observation a eu lieu lorsque la terre était au point de son orbite le plus rapproché de la planète, et la dernière, lorsqu'elle en est le plus éloignée, on trouve que l'intervalle entre la première et la dernière observation ne renferme pas un nombre exact de fois 42 heures ½. Il y a un excédant de 16', 26"; or, cet excédant provient des retards qui se sont accumulés à mesure que la terre s'éloignait de Jupiter, et il est égal au temps que la lumière a mis à parcourir le diamètre de l'orbite terrestre. En observant la dernière éclipse lorsque la terre ne s'est éloignée que d'une partie du diamètre de son orbite, on trouve que le temps employé par la lumière pour parcourir cet espace, est la même fraction du temps qu'elle met à parcourir le diamètre total; par conséquent, la vitesse de la lumière est constante. Or, comme le diamètre parcouru dans 16', 26", est de 68 à 69 millions de lieues, la vitesse de la lumière est d'environ 70,000 lieues par seconde.

623. *Ombre*. Lorsqu'un point lumineux éclaire un corps opaque quelconque, si par le point lumineux on conçoit un cône qui enveloppe et touche le corps, la ligne de contact séparera évidemment la partie du corps qui reçoit de la lumière de celle qui n'en reçoit pas. Le cône au delà du corps renfermera un espace dans lequel la lumière ne pénétrera pas; cet espace forme l'ombre du corps.

624. *Pénombre*. Lorsqu'un corps lumineux a des dimensions finies, la séparation de l'ombre et de la lumière, sur un corps quelconque qu'elle éclaire, n'a pas lieu brusquement. Supposons, par exemple, que le corps lumineux soit une sphère A (*fig.* 1), et le corps éclairé une sphère B; si nous menons les deux cônes tangens aux deux sphères, il est évident que si *a b* et *c d* sont les deux cercles de contact, tous les points de la sphère B, situés en avant de *a b*, seront éclairés par la totalité de la sphère A; que tous les points de la sphère B situés derrière le

cercle *c d*, ne recevront aucun rayon lumineux, et que les points situés entre les cercles *a b* et *c d* recevront une quantité de lumière décroissante à mesure qu'ils s'approcheront davantage de *c d*. L'intervalle compris entre *a b* et *c d*, dans lequel a lieu la dégradation de la lumière, a reçu le nom de Pénombre. L'espace situé derrière la sphère B est aussi composé d'un espace O où la lumière ne pénètre pas, qui est infini quand le corps opaque est plus grand que le corps lumineux, et fini (*fig.* 2) dans le cas contraire. Cet espace est environné d'un autre N qui n'est éclairé que par une partie du corps lumineux, et qui est infini dans tous les cas.

625. *L'intensité de la lumière, émise par un même corps, est proportionnelle au sinus de l'inclinaison sur la surface.* Une surface lumineuse paraît également brillante, quelle que soit l'inclinaison sous laquelle elle se présente; il faut nécessairement en conclure que le rapprochement des rayons, lorsque la surface est oblique, se trouve compensé par la diminution de leur intensité; on trouve, par le même raisonnement que pour la chaleur (359), que l'intensité doit varier proportionnellement au sinus de l'angle avec la surface.

Réflexion.

626. Lorsqu'un rayon de lumière arrive sur la surface d'un corps et se replie vers le milieu qu'il avait pénétré, la déviation qu'il éprouve porte le nom de Réflexion. On appelle angle d'incidence celui qui est formé par le rayon avec la normale (perpendiculaire à la surface) au point d'incidence, et angle de réflexion celui que fait le rayon réfléchi avec cette même normale.

627. *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont situés dans un même plan perpendiculaire à la surface, et l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.* On peut facilement vérifier cette loi, au moyen du cercle divisé (*fig.* 1). A B est une surface plane réfléchissante, C et D deux pinulles mobiles; par l'une on fait arriver un rayon lumineux, et en plaçant l'œil à l'autre on la fait mouvoir jusqu'à ce qu'il reçoive le rayon réfléchi; on trouve alors que les rayons incidens et réfléchis sont également inclinés sur la surface A B (1). Il est très-facile, d'après cela, de trouver le rayon réfléchi, correspondant à un rayon incident sur une surface quelconque; en effet, par le point d'incidence *m*, il faudra mener un plan tangent à

---

(1) Cette loi est la même que celle de la réflexion des corps élastiques, du son et de la chaleur; on peut la déduire du principe de la moindre action (176). En effet, soit A B (*fig.* 4) une surface réfléchissante, M et N deux points par lesquels doivent passer le rayon incident et le rayon réfléchi; si on admet que la vitesse de la lumière est constante, le rayon brisé M *x* N devra être un minimum. Or, si on mène une ellipse qui soit tangente à A B, et dont M et N soient les deux foyers, le point de tangence *x* remplira la condition cherchée, car pour tout autre point *y*, M *y* N serait

la surface, et une perpendiculaire à ce plan; le plan du rayon incident et de cette perpendiculaire renfermera le rayon réfléchi que l'on obtiendra en menant par le point m la ligne m R, de manière que l'angle y soit égal à l'angle x (*fig.* 5).

628. *Disposition des Rayons réfléchis sur une surface plane.* Soit M N (*fig.* 6) une surface plane, O un point lumineux, O A un rayon incident; pour avoir la direction du rayon réfléchi, abaissons du point O une perpendiculaire O X que nous prolongerons d'une quantité égale X O'; si nous menons O' A, je dis que A B, prolongement de O' A, sera le rayon réfléchi : en effet, l'angle a est égal à l'angle b, et ce dernier est égal à l'angle c. La même construction étant applicable à tous les autres rayons incidens, il en résulte que tous les rayons réfléchis, étant prolongés au-dessous de M N, vont passer par un point situé derrière le miroir, sur la perpendiculaire abaissée du point lumineux et à la même distance du miroir que le point lumineux.

629. *Disposition des Rayons réfléchis sur un miroir sphérique.* Soit M N (*fig.* 7) un miroir sphérique, o son centre; supposons d'abord que les rayons partent d'un point situé à l'infini, c'est-à-dire, qu'ils soient parallèles. En coupant le miroir par des plans méridiens parallèles aux rayons, et traçant dans chacun d'eux des rayons incidens très-voisins et leurs rayons réfléchis, on trouve que les rayons réfléchis (1) se coupent deux à deux, et forment une courbe X F Y, à laquelle ils sont tangens. Cette courbe devant être la même pour tous les plans méridiens, il en résulte que les rayons réfléchis se coupent deux à deux sur une surface de révolution autour du rayon de la sphère parallèle à la direction des rayons lumineux, et dont la génératrice est X F Y; cette surface s'appelle Caustique et son sommet F le Foyer. Chaque point de la caustique recevant au moins deux rayons lumineux, est plus brillant que l'espace environnant, et le sommet F recevant tous les rayons réfléchis provenant des rayons incidens voisins de l'axe, est beaucoup plus brillant que tous les autres points; on peut facilement reconnaître la forme de la caustique, en mettant devant un miroir concave, exposé aux rayons solaires, un carton blanc, dans la direction de l'axe de la caustique; on aperçoit très-nettement la section de cette surface. Lorsque le point lumineux est placé à une distance finie, les rayons réfléchis sont encore disposés de la même manière (*fig.* 8), mais la position du foyer F

---

plus grand que M x N. Or, la tangente A B étant également inclinée sur les rayons vecteurs, il en résulte que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion, et comme M x N est le plus petit possible lorsque le plan de l'ellipse est perpendiculaire au plan A B, il en résulte que le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un plan perpendiculaire à A B.

(1) Pour trouver le rayon réfléchi correspondant au rayon incident $a\,m$, il faut mener le rayon $o\,m$ qui est perpendiculaire à la courbe, et $m\,a'$ de manière que l'angle x soit égal à l'angle y.

varie, soit en avant, soit derrière le miroir; dans ce dernier cas, ce sont seulement les prolongemens des rayons qni se coupent. Les positions relatives du point lumineux, du foyer et du miroir étant très-importantes à connaître, nons allons les décrire dans toutes les situations qui peuvent se présenter. Comme en vertn de la loi que suit la réflexion, si le rayon réfléchi retournait suivant la même direction, il se réfléchirait suivant la ligne d'incidence, il en résulte que le point lumineux et le foyer sont réciproques, c'est-à-dire, que si le foyer devenait lumineux, le point lumineux deviendrait le foyer. C'est pourquoi ces deux points s'appellent foyers conjngués.

630. Supposons d'abord que le point lumineux soit situé à l'infini (*fig.* 9): soit A B un rayon incident, B F le rayon réfléchi, O D l'axe optique, c'est-à-dire, le rayon de la sphère parallèle aux rayons lumineux; si l'on mène le rayon O B, il est évident qne l'angle b est égal à l'angle a; et comme ce dernier est égal à l'angle c, le triangle B F O est isocèle et B F est égal à F O, quel que soit le point B. Or, quand B est infiniment voisin de D, F est le foyer; mais alors B F O est égal à D O, par conséquent le foyer est an milieu du rayon. Dans le cas qne nous considérons, le foyer porte le nom de Foyer Principal; ainsi le foyer principal est situé au milieu du rayon.

631. Supposons maintenant que le point lumineux s'avance de l'infini, le foyer s'avancera vers le centre et y arrivera en même temps que le point lumineux. Le point lumineux continuant son mouvement vers le miroir, le foyer s'éloignera du centre et sera à l'infini lorsque le point lumineux sera au foyer principal. Le point lumineux dépassant le foyer principal, le foyer conjngué passera derrière le miroir, par conséquent il ne sera formé que par le prolongement des rayons et sera imaginaire. Lorsqu'il arrivera au point D contre le miroir, le foyer se confondra avec lui. Si on suppose qne le point lumineux continue à se mouvoir derrière le miroir, celui-ci devient convexe, le foyer repasse du côté concave, ne le quitte plus et s'avance vers le point F à mesure que le point lumineux s'éloigne. Ainsi les miroirs convexes n'ont jamais de foyers réels, et les miroirs concaves sont dans le même cas, quand le point lumineux est à une distance du miroir plus petite que la moitié du rayon (1).

(1) On peut obtenir d'une manière très-simple le rapport des distances des foyers conjugés au miroir. En effet, soit M N (*fig.* 10) un miroir concave sphérique, O son centre, F le point lumineux, F m un rayon incident, m F' le rayon réfléchi: le rayon O m divisant l'angle F m F' en deux parties égales, on aura la proportion F' m : F m :: F' O : F O. Lorsque le point m est infiniment voisin du point D, F' m et F m se confondent avec F' D et F D; en désignant ces dernières quantités par p' et p, et le rayon de la sphère par $2r$, la proportion précédente deviendra $p' : p :: 2r - p' : p - 2r$; d'où $p'(p - 2r) = p(2r - p')$; $pp' - 2rp' = 2rp - pp'$; $pp' - rp' = rp$; et divisant par $pp'r$, il vient $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{r}$; d'où $p' = \frac{rp}{p-r}$; on peut facilement, en discutant cette dernière formule, vérifier tout ce que nous avons dit plus haut.

632. Lorsque les rayons réfléchis par un miroir ont un foyer réel, il se forme dans l'espace une image du corps lumineux que l'on peut rendre visible en y plaçant un corps opaque; cette image est le lieu des foyers de tous les points de l'objet lumineux. Dans chaque cas particulier il sera facile, d'après ce qui précède, de construire cette image. Il faudra, par chaque point du corps et le centre de la sphère, mener une droite et déterminer le point de cette droite où se trouve le foyer. Par exemple, soit (*fig.* 11) un objet A B situé en avant du centre, il est évident que son image sera renversée et d'autant plus grande qu'il sera plus voisin du centre. Si l'objet est placé entre le centre et le foyer principal, l'image sera encore renversée (*fig.* 12) et s'il était situé entre le foyer principal et le miroir, il n'y aurait pas d'image, puisque les foyers seraient imaginaires. Par la même raison, les miroirs plans et convexes ne forment point d'images. Il faut bien distinguer ces images qui se forment dans l'espace, de celles que l'on voit dans les miroirs; nous ne parlerons de ces dernières qu'après avoir examiné l'organe de la vision.

633. Dans tout ce qui précède, nous avons supposé les corps, polis et réfléchissant régulièrement la lumière : mais si le corps est couvert d'aspérités, chaque élément de sa surface pourra être regardé comme l'assemblage d'une infinité de facettes situées sous toutes les inclinaisons ; chaque faisceau de lumière se divisera en une infinité de parties qui se dirigeront dans tous les sens, et par conséquent tous les points du corps seront visibles de tous les points de l'espace.

Réfraction.

634. Lorsqu'un rayon lumineux pénètre du vide dans un milieu diaphane, ou d'un milieu diaphane dans un autre plus dense, en général le rayon est dévié de sa direc-

---

Les caustiques dont nous avons parlé pour les miroirs sphériques, ne sont qu'un cas particulier d'une loi beaucoup plus générale et qui peut s'énoncer ainsi : lorsqu'une surface de forme quelconque réfléchit régulièrement des rayons émanés d'un point, on peut toujours tracer sur cette surface deux systèmes de lignes courbes, se coupant à angle droit, dont chaque courbe jouit de la propriété que tous les rayons qui se réfléchissent sur ses différens points forment une surface développable. Les arêtes de rebroussement des surfaces qui s'appuient sur les courbes appartenant à un même système, étant continues et forment une surface continue. Les points où se coupent ces deux surfaces qu'on désigne sous le nom de Caustiques, sont les foyers. Dans le cas de la sphère, un des systèmes de courbes sont les méridiens, l'autre est formé de cercles dont les centres sont sur l'axe optique ; les surfaces développables du premier système sont planes et ont pour arêtes de rebroussement des courbes symétriques par rapport à l'axe, les surfaces développables du second système sont des cônes ayant leurs sommets sur l'axe. Les deux surfaces caustiques sont donc une surface de révolution autour de l'axe, et l'axe lui-même. Leur intersection se réduit à un point qui est le sommet de la caustique, et le foyer se réduit aussi à un seul point.

tion et se rapproche de la normale à la surface. On peut reconnaître le fait de cette déviation par l'observation suivante : si au fond d'un vase (*fig.* 13) on met un corps A, et que l'on se place en M, de manière à voir le corps tangent au bord du vase, en y introduisant de l'eau, le corps paraît élevé et il faut que l'œil se mette en N pour observer le corps tangent au bord du vase, parce que le rayon A D s'incline en sortant de l'eau pour entrer dans l'air.

635. *Loi de la Réfraction.* On a trouvé par l'expérience que le rayon incident et le rayon réfracté étaient tous deux dans un plan perpendiculaire à la surface réfringente, et que, quand le rayon lumineux passait du vide dans un corps diaphane ou d'un corps diaphane dans un autre, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction étaient dans un rapport constant. L'angle d'incidence est l'angle formé par le rayon incident avec la normale à la surface au point d'incidence, et l'angle de réfraction, celui qui est formé par le rayon réfracté avec la même normale. Ce rapport porte le nom d'Indice de réfraction. Dans le système de l'émission, il est égal au rapport des vitesses de la lumière dans le milieu environnant et dans le corps réfringent, et c'est le contraire lorsqu'on considère la lumière comme provenant des vibrations de l'éther.

On voit d'après cela qu'un rayon qui arrive sur un corps réfringent perpendiculairement à sa surface, y pénètre sans éprouver de déviation, puisque d'après la loi énoncée le sinus d'incidence devenant nul, celui de réfraction le devient également. Lorsque le rayon passe du vide dans un corps réfringent, l'angle d'incidence est plus grand que l'angle de réfraction ; par conséquent, le rayon réfracté se rapproche de la normale (*fig.* 14). La même chose a lieu en général quand le rayon passe d'un corps dans un autre d'une plus grande densité. Réciproquement, quand un rayon sort d'un milieu réfringent pour entrer dans le vide ou dans un milieu moins réfringent, le rayon s'écarte de la normale. Ainsi, il y a toujours, pour chaque corps, une incidence sous laquelle le rayon ne peut pas en sortir pour pénétrer dans le vide ou dans un autre corps diaphane moins réfringent, car l'angle d'émergence (de sortie) étant toujours plus grand que l'angle d'incidence, il y a toujours une incidence pour laquelle l'angle d'émergence est de 90° ; alors le rayon émergent devient parallèle à la surface de sortie, et pour un angle d'incidence plus grand, l'angle d'émergence serait plus grand que 90°, et par conséquent la réfraction se changerait en réflexion.

636. *Disposition des Rayons réfractés dans un milieu indéfini, terminé par une surface plane ou sphérique.* Lorsque les rayons lumineux passent du vide ou de l'air dans un milieu terminé par une surface plane ou concave, les rayons réfractés se rapprochent de la normale ; si les rayons incidens partent d'un point à une distance finie ou infinie, leur divergence sera augmentée et ils ne formeront point de foyer réel dans ce milieu (*fig.* 15, 16, 17, 18) ; ce ne serait qu'autant que les

rayons seraient déjà convergens en arrivant sur leurs surfaces, qu'ils pourraient rester convergens dans ces milieux. Mais si la surface du milieu est convexe (*fig.* 19.) dans certaines positions du point lumineux, il se forme un foyer réel (1).

637. ***Disposition des Rayons lumineux à leur entrée et à leur sortie d'un milieu réfringent, terminé par des surfaces planes.*** Supposons d'abord que le milieu soit terminé par deux lames parallèles A B et C D (*fig.* 21): chaque rayon, en pénétrant dans la surface A B, éprouvera une déviation; mais comme il se présentera pour sortir sur la surface C D sous un angle parfaitement égal à l'angle de réfraction sur A B, puisque A B est parallèle à C D, il sortira nécessairement sous un angle égal à l'angle d'incidence sur A B; ainsi le rayon incident et le rayon émergent seront parallèles. Lorsque les deux surfaces qui terminent le corps réfringent sont deux surfaces planes inclinées A B et A C (*fig.* 22), le rayon incident *a b*, en se réfractant suivant *b c*, se rapproche de la perpendiculaire *b m*, et par conséquent s'éloigne du sommet A, et le rayon émergent *c d*, en s'éloignant de la normale *c m*, s'éloigne encore du sommet A; ainsi l'effet d'un milieu réfringent angulaire est d'éloigner le rayon émergent du sommet de l'angle.

638. Nous avons déjà dit que quand un rayon lumineux se présentait pour sortir d'un milieu réfringent, la réfraction se changeait quelquefois en réflexion (635); il est facile de calculer, pour chaque substance, le maximum de l'angle sous lequel ce phénomène doit avoir lieu, lorsqu'on connaît l'indice de réfraction d'un rayon lumineux qui passe du vide ou du milieu environnant dans ce corps. En effet, ce maximum aura évidemment lieu quand l'angle d'émergence sera droit; or, en appelant θ et θ' les angles d'incidence et de réfraction pour un rayon *a b* qui pénètre dans un milieu réfringent, et n le nombre constant pour le même corps et le même milieu ambiant qui exprime le rapport entre le sinus d'incidence et le sinus de réfraction, on aura $\sin\theta = n \sin\theta'$; quand le rayon sort du corps pour entrer dans le vide, θ se trouve l'angle d'émergence; or, à la limite d'émergence, il est égal à 90°, par

---

(1) Soit n l'indice de réfraction, P (*fig.* 20) le point lumineux, C le centre de la surface réfringente, P M un rayon incident s'écartant très-peu de l'axe A C, P' M le rayon réfracté; posons A C $= r$, A P $= p$, A P' $= p'$, nous aurons entre les angles des triangles P M C et C M P' les relations suivantes: C P M = C M N − M C A; C P' M = M C A − C M P'; et C M N = n C M P', d'où l'on tire C P M + n C P' M = $(n-1)$ M C A; ces angles étant très-petits peuvent être considérés comme ayant pour tangentes A M, sous les rayons P A, P' A et A C, et être remplacés par leurs tangentes; remplaçant donc ces angles par leur tangentes et divisant par A M, il vient $\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r}$; en faisant p infini, on aura $\frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r}$, p' est alors le foyer principal; en faisant r négatif ou infini, on aura les formules correspondantes au cas où la surface serait concave ou terminée par une surface plane.

conséquent $\sin\theta = 1$ et $\sin\theta' = \frac{1}{n}$; pour le verre et le vide $n = \frac{3}{2}$, et $\theta' = 41°$, 48', 37'' ; ainsi tous les rayons qui se présenteront pour passer du verre dans le vide sous une plus grande incidence, seront réfléchis dans l'intérieur du verre.

Il est facile de voir, à l'inspection de la fig. 22, que si la ligne A C tourne autour du point A, l'incidence du rayon réfracté *bc* augmentera continuellement à mesure que l'angle A deviendra plus grand; il existera donc nécessairement une grandeur de cet angle pour lequel tous les rayons arrivés par A B, quelle que soit d'ailleurs leur incidence sur B A, se réfléchiront sur A C. Pour obtenir le minimum de l'angle A, qui ne laisse passer aucun rayon, il faut considérer (*fig.* 23) que de tous les rayons qui arrivent au point *a*, celui qui se présente sur la surface A C sous la plus petite incidence est le rayon B *a*, parallèle à A B ; son rayon réfracté *ab*, fait avec la normale un angle θ' dont le sinus est égal $\frac{1}{n}$; or, comme l'angle *d* est égal à 180° — A, $\theta'' = 180 - \theta'_{,} - 180° + A = A - \theta'$, par conséquent $A = \theta'' + \theta'$ et comme $\theta' = \theta''$, attendu que tous deux sont les angles de réfraction correspondans à des angles d'incidence ou d'émergence droits, et que θ' déterminé plus haut est égal à $\frac{1}{n}$, il s'ensuit que $A = \frac{2}{n}$: pour le verre et le vide, $\frac{1}{n}$ est égal à 41°, 48', 37'', et par conséquent A = 83°, 37', 14'', ainsi un prisme de verre dont l'angle aurait cette mesure serait complètement opaque, et à plus forte raison si l'angle était plus grand.

639. On voit d'après cela que si des rayons lumineux arrivent sur un prisme par les faces A C et B C (*fig.* 24), l'œil étant devant la face A B, si l'on mène par les points *a* et *b* les droites *am* et *bn* faisant avec les normales *aa*, *bb'* des angles égaux entre eux et à celui qui correspond à une incidence de 90°, dont le sinus est égal à $\frac{1}{n}$, et la valeur pour le verre de 41°, 48', 37''. Si par le point B on mène une droite BK, parallèle au rayon émergent *mx*, et par le point A une droite AK', parallèle au rayon émergent *ny*, il est évident que, tant que l'œil sera dans l'angle A B K, il recevra les rayons transmis par la face B C, et que quand il sera dans l'angle K B B', les rayons arrivés par B C ne pourront lui parvenir, mais il recevra par réflexion sur B C les rayons entrés par A C; de même tant qu'il sera dans l'angle K' A A', il ne recevra que les rayons venus par B C et qui se réfléchiront sur A C.

640. *Foyer des Lentilles.* On désigne sous le nom de Lentilles des masses d'un corps diaphane, terminées par des portions de sphères. On en connaît de deux espèces, les lentilles convergentes et les lentilles divergentes, ainsi désignées parce que les premières rapprochent les rayons qui les ont traversées et que les dernières les éloignent. Les premières sont toujours plus épaisses au centre que vers les bords, les lentilles divergentes sont toujours au contraire plus minces au centre que vers les bords ; la figure 25 présente toutes les formes de lentilles convergentes, et la figure 26 toutes celles des lentilles divergentes. Il est facile de reconnaître qu'elles jouissent de la pro-

priété que nous avons énoncée. En effet, les surfaces courbes qui terminent les lentilles peuvent être considérées comme formées d'une infinité de petites surfaces planes, et les petites surfaces planes opposées, comme appartenant à des prismes tronqués (*fig.* 27 *et* 28); or ces primes ont leurs bases tournées vers l'axe de la lentille, lorsqu'elle est plus épaisse au centre que vers les bords, et vers les bords dans le cas contraire; mais nous avons vu que quand un rayon lumineux traversait un prisme, le rayon émergent se rapprochait de la base, donc les lentilles (*fig.* 25) font converger les rayons, et les lentilles (*fig.* 26) les rendent divergens.

641. Lorsqu'un système quelconque de rayons traverse une lentille, les rayons à leur sortie se coupent deux à deux et forment une surface caustique, comme les rayons réfléchis sur les miroirs courbes, et les sommets de ces caustiques sont encore désignés sous le nom de Foyers. La détermination de ces foyers est d'une très-grande importance dans la construction d'un grand nombre d'instrumens d'optique, parce que dans tous on n'emploie jamais que des lentilles dont les faces ne sont qu'une très-petite fraction des surfaces sphériques auxquelles elles appartiennent; alors on peut considérer tous les rayons qui les traversent comme se réunissant sensiblement au foyer. Nous décrirons les positions relatives du point lumineux et du foyer que l'on nomme aussi Foyers Conjugués, comme dans la réflexion.

642. On désigne sous le nom de Foyer Principal, celui des rayons parallèles; sa position dépend et du pouvoir réfringent et des rayons des sphères qui terminent la lentille; nous en donnons l'expression dans la note qui suit. Supposons d'abord que la lentille soit convergente; si le point lumineux est à l'infini, le foyer conjugué se trouve derrière la lentille et au foyer principal; à mesure que le point lumineux s'approche, le foyer conjugué s'éloigne de la lentille, et se trouve à l'infini, lorsque le point lumineux est arrivé à la distance du foyer principal; si le point lumineux continue à s'approcher, le foyer revient du même côté que le point lumineux, il est alors imaginaire, et à mesure que le point lumineux continue à s'approcher de la lentille, le foyer s'en approche davantage; quand le premier a atteint la lentille, le second y est arrivé. Pour une lentille divergente, lorsque le point lumineux est situé à l'infini, le foyer principal est du même côté, et par conséquent imaginaire, et à mesure que le point lumineux s'approche, le foyer se rapproche de la lentille; lorsque le point lumineux est arrivé à la distance focale principale, le foyer, toujours imaginaire, est à la moitié de cette distance; si le point lumineux continue à s'approcher, le foyer conjugué arrive sur la lentille en même temps que le point lumineux (1).

(1) La détermination des positions relatives des foyers conjugués des lentilles dans le cas le plus général, repose sur la considération d'un point particulier de la lentille qu'on désigne sous le nom

643. Lorsqu'un corps lumineux renvoie de la lumière à une lentille, chacun de ses points a un foyer particulier, et l'ensemble de tous ces foyers forme dans l'espace une image du corps lumineux ; cette image est toujours renversée, parce que l'axe optique de chaque point sur lequel se trouve le foyer passe vers le centre de la lentille (*fig.* 29) renversée, amplifiée ou diminuée, suivant la forme de la lentille et la distance du point lumineux. Ces images peuvent être rendues visibles en plaçant un carton ou un verre dépoli dans leur lieu. Nous ferons ici une remarque semblable à celle que nous avons faite pour les images par réflexion, c'est qu'il faut bien se garder de les confondre avec celles que l'on voit en regardant à travers les lentilles.

644. *Détermination des indices de réfraction.* Nous avons vu que dans un même

---

de Centre Optique, et qui jouit de la propriété que tous les rayons qui passent par ce point sortent parallèlement à leue incidence ; soit O (*fig.* 30) le centre optique et M N une droite passant pae ce point, cette dernière devra être également inclinée sue les deux rayons C M et C N ; par conséquent, l'engle C M O sera égal à l'angle C' N O, et le triengle C O M sera semblable eu triengle C' O N ; on eura aloes la proportion C O : C' O : : C M : C' N ou C O : C' O : : C H : C' E ou C H — C O : C' E — C' O : : C H : C' E ou O H : E O : : C H : C' E ; ainsi le centre optique est situé sue la ligne des centres et paetage l'épaisseue de la lentille en deux parties proportionnelles eux rayons des faces auxquelles elles eboutissent. Des raisonnemens semblables feraient voir que le centre optique est placé d'une manière analogue dans une lentille dont les surfaces seraient disposées d'une antre manière. Cela posé :

Soit X Y une lentille bi-convexe (*fig.* 31), P nn point lumineux, situé sur la ligne des centres on à une petite distance de cet axe ; P P' sera l'axe optique et le point de rencontre P' d'un rayon émergent N P' provenant d'un rayon incident P M très-voisin de P O, sera le foyer cherché ; désignons per n le pouvoie réfringent de la lentille, par r et r' les rayons des sphères X B Y et X B' Y, par p le distance P O et pae p' la distance O P'.

Il est évident que si nous prolongeons M N, le point G sera le foyee conjugué de P, dans le cas où la substance de la lentille se prolongerait eu delà de X B Y ; on aura donc la relation $\frac{1}{p} + \frac{n}{BG} = \frac{n-1}{r}$ (1). De même P' et G peuvent être considéeés comme foyers conjugués relativement à la surfaee X B' Y en supposant que la substance de le lentille se continue eu delà de cette courbe du côté de son centre ; on aura donc encore la relation $\frac{1}{p'} - \frac{n}{B'G} = \frac{n-1}{r'}$ (2) ; négligeant l'épaissene de la lentille, faisant B' G = B G, et ajoutant les deux équations (1) et (e), il vient $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{n-1}{r} + \frac{n-1}{r'}$ (3).

Si p est infini, p' devient le foyer principal dont le valeur est donnée par l'équetion $\frac{1}{p'} = \frac{n-1}{r} + \frac{n-1}{r'}$; $p' = \frac{rr'}{(n-1)(r+r')}$ (A).

En désignant pae a cette valeue de p', l'équation (3) devient $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$ (B), d'où $p' = \frac{pa}{p-a}$ (C).

Pour obtenir les formules correspondantes poue les lentilles bi-concaves, il faut évidemment changer le signe des deux rayons ; les eelations précédentes deviennent alors $a = -\frac{rr'}{(n-1)(r+r')}$ (A'). $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{a}$ (B') ; $p' = -\frac{pa}{p+a}$ (C').

corps le rapport du sinus d'incidence à celui de réfraction était constant, mais que ce nombre variait d'un corps à un autre ; la connaissance des indices de réfraction de chaque corps diaphane étant d'une très-haute importance, nous allons décrire les méthodes qui ont été employées pour les déterminer, et nous donnerons le tableau des résultats obtenus.

645. La détermination des indices de réfraction se fait par l'expérience suivante : supposons d'abord qu'il s'agisse d'une matière solide, on commence par former un prisme A B C (*fig.* 32) avec la substance que l'on veut observer, et on le met dans une position fixe, de manière que ses arêtes soient verticales ; on place au point M un cercle horizontal divisé, dont l'alidade est garnie d'une lunette renfermant un fil vertical ; on dirige la lunette sur une mire N, située à une grande distance, et on observe ensuite cette même mire vue par réfraction à travers le prisme ; si on fait tourner ce dernier jusqu'à ce que la déviation du rayon réfracté sur le rayon direct, ou l'angle b, soit le plus grand possible, les angles d'incidence et d'émergence seront égaux et on aura entre l'angle a du prisme, l'angle b et le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction du prisme une relation très-simple, d'où l'on pourra facilement déduire ce dernier rapport (1). L'angle b s'observe immédiatement au moyen du cercle horizontal placé au point M ; quant à l'angle a du prisme, nous donnerons plus tard des moyens faciles pour le mesurer avec une grande exactitude. Pour obtenir l'indice de réfraction des substances liquides ou gazeuses, on les introduit dans des prismes formés de lames de verre à faces parallèles ; de semblables prismes vides ne font évidemment éprouver aucune déviation au rayon lumineux ; par conséquent, l'effet produit dans le cas où les lames sont partout d'égale épaisseur, est entièrement dû au prisme de matière moulée dans le prisme creux ; mais comme il est extrêmement difficile de se procurer des glaces dont les faces soient exactement parallèles, on commence par observer la déviation produite par ce défaut de parallélisme et on en

(1) En effet, soit u (*fig.* 33) l'angle d'incidence, u' l'angle d'émergence, x et x' les angles de réfraction, b l'angle de déviation ; si la mire N est à une très-grande distance, on pourra négliger l'angle z et b sera égal à b', et comme dans la position du prisme qui donne le maximum de déviation, on a $x = x'$ et $u = u'$, on en conclut $x = \frac{a}{2}$ et $u = \frac{a+b}{2}$; en effet, dans le quadrilatère A F G E l'angle a plus l'angle G est égal à 2 angles droits, par conséquent $G = 180° - a$; mais dans le triangle F F G, on a $2x + G = 180°$, donc $2x + 180° - a = 180°$, et par conséquent $x = \frac{a}{2}$: dans le quadrilatère, E G F K on a évidemment $+ 2u + G + K = 360°$, ou $+ 2u + 180 - a + 180° - b' = 360°$, ou $2u = b' + a$, ou enfin $u = \frac{b'+a}{2}$; il résulte de là que $\sin u : \sin x :: \sin \frac{b+a}{2} : \sin \frac{b}{a}$:

Quant à la proposition sur laquelle ce calcul est fondé, savoir, que dans la position du prisme qui donne le maximum de déviation les angles d'incidence et d'émergence sont égaux, on peut très-facilement la démontrer par la méthode ordinaire des maxima et minima.

corrige l'effet total. Pour soumettre à l'observation des substances liquides, l'appareil le plus commode est représenté (*fig.* 34) : il est formé d'une masse de verre percée horizontalement d'un canal circulaire et taillée en prisme sur les deux faces auxquelles il aboutit; on ferme ce canal par deux plaques de glace à faces bien parallèles qui sont pressées par des vis ; la masse de verre est percée d'un petit canal ab, afin de pouvoir mettre et enlever les liquides sans déplacer les glaces. Pour les gaz, l'appareil est beaucoup plus compliqué, attendu qu'il faut pouvoir faire le vide dans le prisme creux, y introduire le gaz sans que l'air puisse s'y mêler et mesurer facilement la température et la pression ; la figure 35 représente l'appareil qui a été employé par MM. Biot et Arago dans un grand nombre d'expériences sur la réfraction des gaz ; il est composé d'un gros tube de verre terminé obliquement et fermé par deux glaces faisant entre elles un angle très-grand ; ce tube est percé supérieurement et inférieurement de deux ouvertures ; la première communique avec un tube fermé très-long, renfermant un baromètre à siphon destiné à mesurer la force élastique du gaz ; la seconde avec un tuyau garni d'un robinet que l'on peut mettre en communication avec une machine pneumatique pour faire le vide dans le prisme creux, ou avec des cloches pleines de gaz, afin de les introduire dans le prisme. En observant le prisme vide, on obtiendra le rapport de réfraction pour un rayon qui passe du vide dans l'air, et comme toutes les observations faites en introduisant différens gaz dans le prisme donnent seulement ce rapport pour le passage de l'air dans les gaz, le premier rapport fournira le moyen d'avoir celui du vide et de ces gaz (648).

Il résulte des observations de MM. Biot et Arago et de celles que M. Dulong a publiées récemment sur les gaz : 1° qu'une variation de température de 8 à 32° n'a aucune influence sensible sur les pouvoirs réfringens ; 2° que les pouvoirs réfringens des gaz sont proportionnels à leur densité; la même loi a lieu pour les vapeurs; 3° que le pouvoir réfringent d'un mélange de gaz est égal à la somme des pouvoirs réfringens des gaz mélangés, multipliés chacun par le volume du gaz correspondant et divisée par la somme des volumes; lorsqu'il y a combinaison chimique, cette loi n'a plus lieu. Dans le système de l'émission, on nomme pouvoir réfringent le carré de l'indice de réfraction diminué de l'unité, c'est-à-dire, $n^2 - 1$, parce que cette quantité est proportionnelle à l'intensité de la force accélératrice avec laquelle on suppose que le corps réfringent agit sur la lumière pour la réfracter.

646. Les observations récentes de M. Dulong sur les pouvoirs réfringens des gaz, ont été faites au moyen d'un principe différent de celui que nous avons décrit. (Voyez Annales de Chimie, tom. XXXI, pag. 171). Nous réunirons dans le tableau suivant les résultats qu'il a obtenus à ceux que Newton a donnés.

Indices de réfraction et pouvoirs réfringens des corps solides, liquides et des gaz à 0° et sous la pression de 0m,76.

NATURE DES SUBSTANCES RÉFRINGENTES.	RAPPORT du SINUS D'INCIDENCE au SINUS DE RÉFRACTION.	VALEURS de la PUISSANCE RÉFRACTIVE $n^2 - 1$.	DENSITÉ.
Barite sulfatée	23 à 14	1, 699	4. 27
Verre d'antimoine	17 à 9	2, 568	5, 28
Chaux sulfatée	61 à 41	1, 213	2, 252
Verre commun	31 à 20	1,4025	2, 58
Cristal de roche	25 à 16	1, 445	2, 65
Chaux carbonatée	5 à 3	1, 778	2, 72
Sel marin	17 à 11	1, 388	2, 143
Alun	35 à 24	1,1267	1, 714
Borax	22 à 15	1,1511	1, 714
Salpêtre	32 à 21	1, 345	1, 9
Sulfate de fer	303 à 200	1, 295	1, 715
Acide sulfurique	10 à 7	1, 041	1. 7
Eau de pluie	529 à 396	0,7845	1,
Gomme arabique	31 à 21	1, 179	1, 375
Alcool rectifié	100 à 73	0,8765	0, 866
Camphre	3 à 2	1, 25	0, 996
Huile d'olive	22 à 15	1,1511	0, 913
Huile de lin	40 à 27	1,1948	0, 932
Essence de térébenthine	25 à 17	1,1626	0, 874
Ambre	14 à 9	1, 42	1, 04
Diamant	100 à 41	4, 949	3. 4
Air atmosphérique	1,000 à 294	0,000589	1,
Oxigène	1,000 à 272	0,000544	1,1025
Hydrogène	1,000 à 138	0,000277	0,3685
Azote	1,000 à 300	0,000601	0, 976
Ammoniaque	1,000 à 385	0,000771	0, 591
Acide carbonique	1,000 à 449	0,000899	1, 524
Chlore	1,000 à 772	0,001545	2, 47
Acide hydro-chlorique	1,000 à 449	0,000899	1, 254
Oxide d'azote	1,000 à 503	0,001007	1, 527
Gas nitreux	1,000 à 303	0,000606	1, 039
Oxide de carbone	1,000 à 340	0,000681	0, 972
Cyanogène	1,000 à 834	0,001668	1, 818
Gas oléifiant	1,000 à 678	0,001356	0, 980
Gaz des marais	1,001 à 443	0,000886	0, 559
Ether muriatique	1,000 à 095	0,002191	2, 234
Acide hydro-cyanique	1,000 à 451	0,000903	0, 944
Oxide chloro-carbonique	1,001 à 159	0,002318	3, 442
Acide sulfureux	1,000 à 665	0,001331	2, 247
Hydrogène sulfuré	1,000 à 644	0,001288	1, 178
Ether sulfurique	1, 00 à 153	0,003061	2, 580
Soufre carburé	1, 00 à 150	0, 00301	2, 644
Hydrogène proto-phosphoré	1,000 à 789	0,001579	1, 256

647. Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que la lumière n'éprouvait dans la réfraction aucune autre altération que sa déviation; mais il n'en est pas ainsi: un rayon de lumière blanche qui traverse un prisme, en sort dilaté et coloré (*fig.* 35); ce phénomème porte le nom de dispersion; nous verrons bientôt à quoi il faut l'attribuer. Le faisceau réfracté est d'autant plus dispersé que le pouvoir réfringent de la substance est plus considérable; pour les gaz, la dispersion est peu sensible, mais pour les substances solides ou liquides, les rayons colorés sont très-écartés. Dans la table précédente, les pouvoirs réfringens ont été observés sur le rayon jaune qui occupe le milieu du faisceau.

648. Si on voulait déduire du tableau précédent l'indice de réfraction correspondant au passage du rayon lumineux d'un corps dans un autre, il faudrait diviser l'indice de réfraction du premier corps qui se trouve dans le tableau, par celui du second; en effet, nous avons dit (635) que l'indice de réfraction était égal au rapport des vitesses de la lumière dans le corps et dans le vide, dans le second corps ou dans le premier. Par conséquent, si on appelle v la vitesse dans le vide, V la vitesse dans le premier corps, et V' la vitesse dans le second, n et n' les indices de réfraction des deux corps, on aura $V = vn$, et $V' = vn'$, d'où l'on tirera $V : V' = \frac{n}{n'}$.

Dispersion de la Lumière par Réfraction.

649. Nous venons d'indiquer le fait général de la dispersion qui accompagne toujours la réfraction, lorsque la surface d'émergence n'est point parallèle à la surface d'incidence. Nous allons maintenant étudier avec soin tous les détails de cet important phénomène.

650. Imaginons qu'on ait pratiqué au volet d'une chambre obscure, une ouverture d'un très-petit diamètre, par laquelle s'introduit un faisceau délié de rayons solaires; si on reçoit le faisceau direct sur un prisme de verre blanc et bien transparent, et le faisceau réfracté sur un carton blanc, on observe que l'image (*fig.* 36) est alongée perpendiculairement aux arêtes parallèles du prisme, qu'elle est terminée par deux lignes droites parallèles et par deux demi-cercles, et que toute la surface de l'image est formée de bandes parallèles entre elles et aux arêtes des prismes colorés des teintes les plus brillantes; l'extrémité la plus voisine de l'angle réfringent du prisme est d'un rouge vif, l'extrémité opposée est violette; le nombre des teintes intermédiaires est infini, mais on est convenu d'en prendre quelques-uns pour termes de comparaison; ces teintes se succèdent dans l'ordre suivant: *rouge*, *orangé*, *jaune*, *vert*, *bleu*, *indigo*, *violet*. Dans l'image solaire, ces couleurs passent

de l'une à l'autre d'une manière continne par une infinité de nuances intermédiaires. Cette image porte le nom de Spectre Solaire, les bords n'en sont pas nettement tranchés, à cause de la pénombre (624) que produit le diamètre apparent du soleil; mais on peut obtenir des lignes de démarcation d'ombre et de lumière très-nettes en recevant le trait de lumière sur une lentille avant de le faire passer à travers le prisme (*fig.* 37). Tous les rayons passant par le foyer, c'est comme s'ils émanalent de ce point. Lorsque l'on veut observer quelque temps ce phénomène, comme le mouvement du soleil change à chaque instant la direction du faisceau incident, on est obligé de déplacer souvent la lentille, le prisme et le carton qui reçoit le spectre; pour éviter cet inconvénient, on reçoit extérieurement le rayon solaire sur un miroir métallique dont on fait varier la position, de manière à avoir un rayon réfléchi de direction constante; cette variation peut s'obtenir par un mouvement d'horlogerie; l'appareil porte alors le nom d'Héliostat; nous l'examinerons plus tard. Quelle que soit la nature de la substance réfringente dont le prisme est formé, on obtient des spectres dans lesquels les teintes sont distribuées de la même manière, seulement la grandeur relative des bandes colorées varie avec la nature de la substance; quand la substance est elle-même colorée, le spectre est de la même teinte, à travers laquelle ressortent les autres nuances.

651. Les observations que nous avons faites sur le spectre solaire s'expliquent très-bien dans l'hypothèse de l'émission, en supposant que les rayons de lumière blanche soient formés de rayons parallèles jouissant individuellement de la propriété de produire la sensation d'une couleur déterminée, et ensemble de celle de la lumière blanche, et qui étant doués de pouvoirs réfringens différens, sont séparés par tous les corps diaphanes dont les faces d'incidence et d'émergence ne sont point parallèles. Pour que cette hypothèse satisfasse aux phénomènes observés, il faut reconnaître : 1° que l'alongement du spectre solaire ne peut pas être produit par la dispersion de rayons également réfrangibles; 2° que les rayons colorés ont individuellement des pouvoirs réfringens différens; 3° et enfin, que la réunion des rayons colorés produit réellement de la lumière blanche.

652. Il est facile de reconnaître que la dilatation de l'image solaire ne peut pas être attribuée à la réfraction des rayons également réfrangibles; car si des rayons homogènes partis du point *o* (*fig.* 38) traversent le prisme A B C, on peut toujours donner à ce prisme une position telle que le spectre S S' ait la même étendue et la même forme que l'image directe *s s'*, qui serait reçue à la même distance du prisme; en effet, pour que cette condition ait lieu, il suffit que l'angle formé par les rayons réfractés extrêmes S I, S I' soient égaux à l'angle R O R' des rayons incidens, car alors l'image réfractée S' S sera évidemment égale à celle que produirait un faisceau de même angle venu du point K; à la vérité, le point K n'étant

pas à la même distance du tableau que le point O, des faisceaux de même angle partis des points O et K, ne donneront pas des images rigoureusement égales sur le tableau; mais en supposant que les distances des points O et K au prisme soient très-petites relativement à celle du prisme au tableau, ces images seront parfaitement égales; reste donc à faire voir que dans une certaine position du prisme, l'angle K peut être égal à l'angle O, ou que S' I' A — S I A = R O R'; or, c'est ce qui arrivera quand on aura S I A = B R' O, car alors C I R = C R' I', et par conséquent C I' R' = C R I, puisque ces derniers angles sont les supplémens de C I R + C et de C R' I' + C. On aura donc aussi S' I' A = O R B, et en retranchant la première équation de la dernière, on trouvera S I' A — S I A = O R B — O R' B = R O R'. Ainsi, dans cette position du prisme, l'image reçue après la réfraction sera égale à l'image qui serait reçue directement; or, c'est ce qui n'arrive jamais pour la lumière blanche, tant que l'angle réfringent du prisme n'est pas nul; elle est toujours alongée perpendiculairement aux arêtes du prisme, tandis que l'image directe est circulaire; le prisme peut facilement être mis dans la position dont il s'agit, car c'est celle qui donne le maximum de déviation.

653. Si dans le carton qui reçoit le spectre solaire, on perce un trou correspondant au centre d'une bande colorée (*fig.* 39), le faisceau de rayons colorés qui passera à travers sera isolé du reste des rayons et pourra être examiné séparément. En lui faisant traverser un second prisme E F D, on remarque que sa teinte reste constante, et si en traversant ce second prisme, l'incidence est égale à l'émergence, son image directe est égale à son image réfractée, ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que l'indice de réfraction est le même pour tous les rayons qui le composent: en recueillant ces rayons sur une lentille, ils se réunissent en un seul foyer, d'où l'on doit conclure encore que tous les rayons qui le composent sont également réfringens. Si on pratique sur le carton M N qui reçoit le spectre, une seconde ouverture correspondante au centre d'une autre bande colorée, le nouveau rayon, en passant à travers ce second prisme, se comportera comme le premier; mais en examinant la position des deux images après la seconde réfraction, on reconnaît facilement que les rayons qui les ont produites ont des pouvoirs réfringens différens, car la distance des images est plus grande que celle qui résulterait de l'égale réfrangibilité des rayons; mais ce fait devient bien plus évident en faisant l'expérience de la manière suivante : si l'on reçoit d'abord le trait de lumière solaire dans un prisme dont les arêtes soient verticales, on aura un spectre horizontal dont les bandes colorées seront verticales; on pourra alors faire passer à travers le carton, des rayons de différentes couleurs situés dans un même plan horizontal; or si l'on reçoit ces rayons sur un prisme dont les arêtes soient horizontales, et l'angle réfringent tourné vers le haut, on remarque que les images sont à des hauteurs inégales; le rayon rouge donne l'image la plus élevée, et le rayon violet celle qui est la

plus basse. On peut encore vérifier ces inégalités de pouvoir réfringent en traçant sur un carton noir et sur la même ligne des bandes de différentes couleurs ; en les regardant à travers un prisme, on les voit inégalement élevées. Ainsi chaque rayon coloré conserve sa teinte par la réfraction, son pouvoir réfringent est constant pour le même corps, et dans les mêmes circonstances les pouvoirs réfringens des rayons différens sont inégaux ; et comme dans les spectres formés par toutes les substances réfringentes la succession des teintes est la même, il en résulte que le rayon violet est le plus réfrangible, le rayon rouge celui qui l'est le moins, et qu'entre ces deux limites, les pouvoirs réfringens des rayons varient d'une manière continue ; mais les rapports des pouvoirs réfringens des différens rayons ne sont pas les mêmes pour tous les corps, car le spectre solaire produit par des prismes égaux de différentes substances, n'a pas la même étendue, et les bandes colorées n'ont pas des rapports d'épaisseur constans ; il est même des substances diaphanes qui ne laissent passer que certains rayons, telles sont toutes celles qui sont colorées.

654. Reste enfin à reconnaître si la réunion de tous les rayons séparés par un prisme peut produire de la lumière blanche. Pour cela, recevons le spectre sur une lentille : chaque système de rayon ayant un pouvoir réfringent différent, formera un foyer séparé, et il y aura par conséquent sur l'axe de la lentille une suite de foyers distincts, mais qui seront peu éloignés les uns des autres, car les pouvoirs réfringens diffèrent peu ; si on place dans le lieu des foyers un miroir métallique oblique à l'axe, il réfléchira régulièrement les rayons appartenant à chaque cône réfracté, et il paraîtra coloré d'une teinte qui variera avec la position de l'œil ; mais si on y place un carton, une feuille de papier ou un corps non poli, la réflexion diffuse des rayons les mêlera, et on n'apercevra qu'une image blanche, légèrement colorée sur ses bords. Pour rendre encore plus évident que c'est la sensation simultanée de tous les rayons qui produit la lumière blanche, on prend un carton découpé (*fig.* 40) que l'on fait mouvoir devant le spectre solaire de manière à intercepter successivement différentes bandes colorées ; alors le carton placé au foyer de la lentille prend différentes nuances qui dépendent des rayons interceptés ; mais si on fait mouvoir rapidement le carton, l'image du foyer reste blanche : ici les sensations des différentes couleurs sont réellement successives, mais comme la sensation dans l'organe a une certaine durée, si cette dernière est plus grande que le temps total de leur succession, l'effet produit sera le même que si elles étaient simultanées. On peut encore rétablir la lumière blanche en rendant les rayons parallèles ; il suffit pour cela de regarder le spectre (*fig.* 41) avec un prisme de même matière, d'un angle réfringent égal et placé de la même manière ; les rayons se trouvant dans des circonstances inverses de celles qui les ont séparés, redeviendront parallèles et produiront de la lumière blanche ; c'est ce qu'on observe en effet.

655. *Teintes composées produites par les mélanges des couleurs simples.* Nous avons vu dans ce qui précède que chaque rayon simple ne se divisait plus et avait une teinte variable à l'infini entre les deux limites extrêmes, le rouge et le violet. En observant ce qui se passe sur la palette du peintre, où il obtient toutes les nuances par le mélange d'un petite nombre de couleurs, plusieurs physiciens avaient pensé que la même chose avait lieu pour certaines couleurs du spectre solaire ; par exemple, que le violet était un mélange de rayons rouges et bleus, le vert un mélange de rayons bleus et jaunes, etc. ; mais il n'en est pas ainsi. A la vérité, chaque bande colorée du spectre renferme une plus ou moins grande quantité de rayons des tranches voisines, mais en purifiant un des rayons du spectre par une nouvelle réfraction, on obtient des rayons parfaitement simples qui affectent toutes les couleurs. Pour concevoir comment ce mélange de couleurs peut avoir lieu dans le spectre solaire, il faut observer que la lumière blanche qui vient frapper le prisme a la forme d'un cône droit; par conséquent, chaque image colorée est une ellipse plus ou moins alongée, suivant l'inclination du prisme, et qui est d'autant plus rapprochée du sommet de l'angle réfringent que les rayons qui l'ont produite sont moins réfringens; ainsi le spectre est réellement formé d'une infinité d'ellipses différemment colorées et superposées comme l'indique la figure 42.

656. Tous les corps colorés que nous offre la nature, même les fleurs dont les teintes sont souvent si vives, n'envoient jamais à l'œil des rayons simples, car si on les regarde à travers un prisme, on voit leur image bordée de franges de différentes couleurs. Les franges ne se manifestent que vers les bords, parce que les bandes colorées qui proviennent des points intérieurs étant superposées, se neutralisent, donnent la teinte générale du corps, et par conséquent celles des points extrêmes étant les seules isolées sont les seules visibles.

657. Newton a fait beaucoup d'essais pour former une teinte blanche en mêlant des poudres colorées, mais il n'a jamais pu obtenir qu'une teinte grisâtre : la raison en est que ces poudres absorbant toutes une grande quantité de lumière blanche, on doit obtenir une teinte semblable à celle qui proviendrait d'un mélange de blanc et de noir.

658. Newton appelle couleurs complémentaires celles qui étant réunies forment de la lumière blanche; pour obtenir la couleur complémentaire d'une teinte quelconque, Newton a donné la règle suivante : ayant décrit du point C (*fig.* 43), comme centre, un cercle dont le rayon soit égal à l'unité, et divisé sa circonférence en sept parties proportionnelles aux nombres $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{9}$, si on considère les différens secteurs comme représentant les sept couleurs principales du spectre, et si l'on place aux points r, o, j, v, b, i, u, qui sont les centres de gravité des arcs de cercles, des poids proportionnels aux longueurs de ces arcs, le centre de gravité total passera par

le point C, et ce sera le cas de la blancheur parfaite que produit la sensation simultanée de toutes les nuances, lorsqu'elles sont mélangées dans les proportions où elles se trouvent naturellement dans le spectre. Mais si nous sopposons les proportions altérées, il faudra placer sur chaque centre de gravité des poids qui ne seront plus dans le rapport des arcs ; alors le centre de gravité ne coïncidera plus avec le point C, il tombera en un point G quelconque ; si alors on mène G C, la direction de cette ligne indiquera la nuance dominante du mélange, et sa longueur la vivacité de la teinte. Le cercle divisé dont nous venons de parler est très-propre pour démontrer que la sensation de la lumière blanche est le résultat des sensations simultanées de toutes les nuances du spectre ; en effet, si on couvre chaque secteur de la nuance qui lui correspond, en découpant le cercle et le faisant mouvoir rapidement autour de son centre, on l'apercevra parfaitement blanc.

659. *Inégale réflexibilité des rayons colorés.* Nous avons vu (635) que quand un rayon se présentait pour sortir d'un corps réfringent pour entrer dans le vide ou dans un corps moins réfringent, la réfraction se changeait en réflexion, et cela arrivait quand l'angle d'émergence devenait plus grand que 90°, ou quand le sinus de l'angle d'incidence était plus grand que $\frac{1}{n}$; or, comme l'indice de réfraction n'est pas le même pour les rayons de différentes couleurs, il en résulte que les limites des angles sous lesquels ils doivent se réfléchir sont différentes; par exemple, le rayon violet étant le plus réfringent, commencera à se réfléchir sous un plus petit angle que le rayon rouge qui l'est le moins. Newton a vérifié ce fait par l'expérience suivante : il fit tomber un trait de lumière solaire dans une chambre obscure, perpendiculairement à la face A C (*fig.* 44.) d'un prisme B A C, dont les angles B et C étaient de 45° ; le rayon arrivé en I, se divisa en deux parties, l'une fut réfléchie et sortit par la face A B, sans éprouver de dispersion sensible, tandis que l'autre partie fut réfractée au point I et forma sur un carton le spectre $m\,n$; le rayon réfléchi fut reçu après son émergence sur le prisme $a\,b\,c$ et forma un autre spectre $m'\,n'$; alors en faisant tourner le prisme A B C, de manière à augmenter l'angle d'incidence sur la face B C, il remarqua que la partie violette diminuait dans le spectre $m\,n$ et augmentait dans le spectre $m'\,n'$, et que toutes les couleurs s'affaiblissaient successivement dans le spectre $m\,n$ et se renforçaient dans le spectre $m'\,n'$, suivant l'ordre violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge ; ce qui confirme parfaitement ce que nous avons annoncé.

660. *Propriété calorifique des Rayons colorés.* En 1775, Rochon découvrit que les différens rayons colorés produisaient sur le thermomètre des degrés de chaleur différens. Dans ses expériences, le rayon de lumière coloré était réuni au foyer d'une lentille, où se trouvait le thermomètre. Il reconnut ainsi que le rayon rouge renferme le plus de calorique, et que cette quantité décroît jusqu'au rayon violet, où se trouve le minimum; le rapport entre les élévations du thermomètre produites

par le rayon rouge et par le rayon violet, était comme 8 est à 1. Herschell trouva pour le même rapport les nombres 7 et 2, et que la faculté calorifique existait au-delà du spectre dn côté des rayons rouges où le maximum répondait à ½ pouce des rayons rouges. M. Leslie en répétant ces expériences au moyen d'un appareil semblable an thermomètre différentiel (358), assigna pour le rapport en question les numbre 1 et 16; mais il ne reconnut pas de rayons calorifiques au-delà du spectre. M. Berard a aussi vérifié ce dernier fait.

661. *Propriétés chimiques des Rayons colorés.* La lumière solaire a nne grande influence sur plusieurs phénomènes chimiques; sa présence est nécessaire à la formation des parties vertes des plantes; elle détermine la combinaison du chlore et de l'hydrogène; elle fait passer au violet le chlorure d'argent, etc. Il était important de vérifier si cette propriété appartenait également à tous les rayons. Schéele reconnut le premier que le rayon violet agissait plns fortement sur le chlornre d'argent; Sennebier découvrit ensuite que le rayon violet avait aussi plus d'influence pour le développement de la partie verte des végétaux. MM. Wolaston, Ritter, Bockmann et Berard ont reconnn depuis que l'action chimique s'étendait au-delà dn spectre, du côté des rayons violets. Pour donner nne idée de la différence d'action chimique des rayons rouges et violets, nous rapporterons une des expériences de M. Berard: ayant concentré, au moyen de deux lentilles, les rayons rouges et les rayons violets, du chlorure d'argent placé au foyer des rayons violets était coloré en moins de cinq minutes, tandis que celui qni était placé au foyer des rayons rouges n'avait éprouvé aucune altération après deux heures.

662. *Propriétés éclairantes.* D'après les expériences d'Herschell, le maximum de lumière existe dans les rayons jannes et verts, et diminue insensiblement jusqu'au violet, où se trouve le minimum; Newton avait déjà annoncé des résultats peu différens.

Coloration de la Lumière en passant à travers les Lames minces.

663. Lorsque la lumière passe à travers des corps d'nne grande ténuité, elle prend les teintes variées que présente le spectre solaire produit par réfraction; ainsi les bulles de savon, le verre soufflé, les huiles essentielles que l'on répand sur un liquide noir, offrent souvent les conlenrs les plus brillantes. Nous allons décrire, d'après Newton, ces phénomènes et leurs lois, et ce ne sera que plus tard que nous exposerons les différentes hypothèses émises pour les expliquer.

664. Si, après avoir placé une lentille A B (*fig.* 45) sur nn verre plan C D, on fait arriver sur la lentille un rayon simple, l'œil étant placé de manière à ne recevoir que la lumière réfléchie sur C D, on apercevra au point de contact une

tache noire circulaire, et une série de cercles concentriques d'une certaine épaisseur, alternativement noirs et de la couleur reçue par l'appareil : le même phénomène a lieu quelle que soit la teinte du rayon transmis.

665. En plaçant l'œil de manière à recevoir les rayons transmis à travers la lentille et le plan, on observe un cercle blanc au point de contact, et une suite de cercles alternativement noirs et colorés, disposés de telle manière que le lieu d'un cercle coloré vu par réflexion est celui d'un cercle noir vu par réfraction et réciproquement ; c'est ce qui devait en effet avoir lieu, car les anneaux obscurs par réflexion indiquent que là il y a transmission et réciproquement.

666. Newton, en mesurant les diamètres des anneaux colorés produits par un même rayon par réflexion, trouva que leurs carrés étaient entre eux dans le même rapport que la suite des nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, etc., et que les carrés des diamètres des anneaux transmis étaient comme les nombres pairs 2, 4, 6, 8, 10, etc. Or, il est facile de démontrer que la distance d'un point quelconque de la lentille à la lame C D, est en raison des carrés de la distance au point de contact ; par conséquent, les épaisseurs des lames d'air correspondantes aux anneaux, sont :

Pour les anneaux réfléchis comme 1, 3, 5, 7, 9, 11, etc.

Pour les anneaux transmis comme 2, 4, 6, 8, 10, 12, etc.

Ces rapports restent les mêmes, quelles que soient la teinte du rayon simple et la nature des corps réfringens dont la lentille et la plaque sont formées ; mais pour chaque couleur, la valeur absolue de l'épaisseur de la lame d'air, correspondante à un anneau de même rang, est variable. Les anneaux de même rang formés dans le même appareil par la lumière rouge ont des diamètres plus grands que ceux qui sont formés par les rayons orangés ; ces derniers sont plus grands que ceux de la lumière jaune et ainsi de suite jusqu'au violet dont les diamètres sont les plus petits. L'épaisseur des anneaux diminue de la même manière du rouge au violet.

A mesure que les anneaux s'éloignent du centre, ils se rapprochent davantage, s'affaiblissent et disparaissent.

667. Si on fait arriver sur l'appareil de la lumière blanche, chaque couleur simple forme sa série d'anneaux, et comme ceux de même ordre, mais qui appartiennent à des couleurs différentes, ont des diamètres inégaux, ils anticipent les uns sur les autres et forment des anneaux dont les couleurs sont variables, et dont la vivacité diminue à mesure que leurs diamètres deviennent plus grands, de sorte qu'ils finissent par devenir invisibles ; en regardant à travers un prisme, on en aperçoit un plus grand nombre qu'à l'œil nu, parce qu'il sépare ceux qui étaient trop rapprochés pour être distincts.

668. En employant une lame mince d'un corps quelconque, on obtient des ré-



sultats parfaitement semblables à ceux que nous a présentés une lame d'air; et Newton a reconnu sur quelques substances, que les rapports entre les diamètres des anneaux colorés de même rang et de même teinte étaient comme le sinus d'incidence au sinus de réfraction d'un rayon qui passerait du premier corps dans le second.

669. Les anneaux colorés qui se forment dans l'air présentent quelques phénomènes particuliers qu'il est nécessaire de faire connaître : 1° les diamètres des anneaux restent les mêmes lorsque l'on raréfie l'air, même lorsque l'appareil est placé dans le vide le plus parfait que nous puissions produire : la raison en est que le pouvoir réfringent de l'air étant très-faible, le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction, pour un rayon qui passe du vide dans l'air, étant très-voisin de l'unité, ne peut pas altérer les diamètres des anneaux d'une manière sensible; 2° lorsqu'on introduit de l'eau entre la lentille et la lame (*fig.* 45), les anneaux deviennent beaucoup plus petits et ne changent pas de diamètre par l'inclinaison de l'œil, tandis que les anneaux produits dans l'air éprouvent au contraire de très-grandes variations dans les mêmes circonstances; cette différence provient de ce que le rayon qui traverse la lame d'eau étant fortement réfracté, s'écarte peu de sa direction, quelle que soit l'inclinaison du rayon incident, tandis que le rayon qui passe dans l'air s'écarte beaucoup de sa direction à mesure qu'il devient plus oblique; or, comme c'est l'épaisseur de la lame traversée par le rayon qui détermine la position des anneaux, on voit qu'ils doivent peu varier dans l'eau par l'inclinaison, et qu'il n'en est pas ainsi pour l'air.

670. On doit conclure de ce qui précède que quand un rayon de lumière blanche vient frapper une lame mince, cette dernière jouit de la propriété de réfléchir ou de réfracter à sa seconde surface un certain rayon dont la couleur dépend de l'épaisseur de la lame et de son pouvoir réfringent. Pour une même lame, les épaisseurs correspondantes à la réflexion ou à la réfraction d'une même couleur suivent des progressions semblables, mais dont la valeur absolue d'un même terme n'est pas égale pour les différentes couleurs ; et pour des lames de différentes natures, les épaisseurs qui réfléchissent ou transmettent un rayon coloré du même ordre, sont entre elles dans le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction, de la première à la seconde. Il résulte de là que connaissant l'épaisseur d'une lame correspondante à la réflexion ou à la transmission d'un certain rayon coloré, on pourra facilement en déduire les couleurs transmises ou réfractées par toutes les autres épaisseurs, et que ces résultats étant connus pour un corps réfringent, on pourra les obtenir pour tout autre corps dont on connaîtra le pouvoir réfringent ; par conséquent, le pouvoir réfringent d'une lame, la couleur qu'elle réfléchit ou transmet et son épaisseur sont liés de manière que la connaissance de deux de ces trois choses conduit à la détermination de la troisième.

Diffraction.

671. On désigne sous le nom de Diffraction de la lumière, les modifications qu'elle éprouve en passant auprès des extrémités des corps.

672. Lorsque l'on fait pénétrer des rayons solaires dans une chambre obscure, par une ouverture d'un très-petit diamètre, et qu'après avoir formé un spectre solaire à l'aide d'un prisme, on laisse passer derrière l'écran et par un très-petit trou un rayon simple, on remarque que les ombres des corps placés dans le faisceau lumineux, au lieu d'être terminées d'une manière tranchée, comme cela devrait être si la lumière marchait toujours en ligne droite, sont fondues sur leurs couleurs et bordées de trois franges colorées très-distinctes, dont les largeurs sont inégales et vont en diminuant de la première à la troisième; et quand le corps interposé est assez étroit, on voit même des franges dans son ombre, qui paraît alors divisée par des bandes obscures et des bandes plus claires placées à des distances égales les unes des autres. Nous désignerons la première espèce de franges sous le nom de *franges extérieures*, et les dernières sous le nom de *franges intérieures*.

673. Lorsqu'on fait varier la couleur du rayon transmis, les franges sont disposées de la même manière, seulement elles n'occupent pas le même lieu; il résulte de là que quand le corps est éclairé par un faisceau de lumière blanche, les franges doivent présenter différentes teintes; l'ordre des couleurs est le même que dans les anneaux colorés, le rouge est en dehors et le violet en dedans. Dans tout ce qui suivra nous supposerons que la lumière est homogène; c'est le cas le plus simple, les autres s'en déduisent facilement; et pour que nous puissions regarder la source de la lumière comme un point mathématique, nous admettrons que le faisceau de lumière a été réuni au foyer d'une lentille avant de tomber sur le corps qui projette son ombre sur un carton blanc.

674. *Franges extérieures.* Si l'on laisse pénétrer la lumière homogène par un trou circulaire d'un très-petit diamètre, tel par exemple que celui que l'on obtiendrait avec une aiguille très-aiguë, l'image renferme une tache centrale colorée, environnée d'anneaux successivement noirs et colorés, dont l'étendue totale est beaucoup plus grande que celle qui résulterait de la projection conique de l'ouverture, et on observe qu'en écartant le tableau, le diamètre de chaque anneau augmente plus rapidement que la distance, par conséquent, les anneaux sont placés sur des cônes curvilignes dont la convexité est tournée en dehors. La largeur d'un anneau, c'est-à-dire la distance du milieu de l'épaisseur de deux anneaux consécutifs de mêmes ordres, varie avec le pouvoir réfringent des rayons, de sorte qu'elle est plus grande pour les rayons rouges que pour les rayons violets. Si on opère sur de la lumière blanche, la super-

position des anneaux de différente couleur produit des franges dont le rouge est toujours le plus près de l'ombre pure, et le violet en dedans de l'anneau.

675. Lorsque, à la place d'une ouverture circulaire, on se sert d'un appareil présentant une fente longitudinale dont un des côtés peut être approché ou éloigné, on observe, quand l'ouverture rectiligne a un grand diamètre, qu'elle est, par exemple, de 10 à 12 millimètres, que l'image blanche formée sur le carton est rectangulaire, et les ombres ne présentent que des traces peu sensibles de franges; mais en diminuant graduellement la distance des deux bords de l'ouverture en conservant leur parallélisme, on voit les longs côtés de l'image se border en dedans de lignes blanches très-fines, plus lumineuses que le reste; puis en approchant toujours les lames, ces lignes lumineuses deviennent des franges colorées qui se rejettent des deux côtés de l'ombre en laissant entre elles une image blanche plus large et plus dilatée que précédemment.

676. Si les bords ne restaient point parallèles, de manière que l'ouverture ait la forme d'un trapèze, les bandes colorées ne seraient plus parallèles, mais suivant la direction des faisceaux qui les produisent, elles prendraient la forme trapézoïdale, étant plus larges du côté où les lames sont plus rapprochées, et plus étroites dans les endroits où elles s'écartent le plus.

677. En augmentant progressivement le diamètre de l'ouverture, les bords restant parallèles, les franges se resserrent de plus en plus jusqu'à une certaine limite, après laquelle leur déviation demeure constante, ce qui prouve qu'un seul côté de l'ouverture peut former des franges dans la lumière qui passe près de lui; ces dernières franges sont d'autant plus larges que l'on incline davantage le rayon incident.

678. *Franges intérieures*. Si au lieu d'arrêter le faisceau incident par une plaque métallique percée de différentes ouvertures, on place dans le faisceau lumineux un fil métallique dont le diamètre soit assez petit pour que la lumière l'environne et déborde des deux côtés, alors on remarque non-seulement que son ombre est terminée extérieurement par des franges, comme si le corps avait une épaisseur indéfinie, mais encore que l'ombre renferme des franges intérieures. Quand la lumière est simple, ces franges intérieures sont de la même couleur et séparées par des intervalles absolument noirs; leur nombre est toujours impair, et une d'elles occupe le centre de l'ombre; leur épaisseur, ainsi que celle des bandes noires qui les séparent, augmente à mesure qu'on éloigne le tableau qui les reçoit. Quand on intercepte avec un écran placé avant ou après le corps, la lumière qui passe d'un côté, les franges intérieures disparaissent. C'est à M. Young que l'on doit cette observation. M. Arago a reconnu depuis que la disparition des franges peut être également opérée par l'approche d'un écran transparent suffisamment épais, et qu'elle est progressive avec l'épaisseur, de sorte que les écrans minces ne font que transporter les franges du côté où ils se trouvent.

Nous verrons plus tard que ce phénomène fournit un moyen très-exact pour mesurer le pouvoir réfringent des gaz.

679. Les franges produites dans les différentes circonstances que nous avons décrites sont indépendantes de la nature du corps, de sa forme et de son épaisseur.

680. Il résulte de ce qui précède, 1° que les rayons lumineux sont infléchis en passant dans le voisinage des corps opaques, 2° que cette inflexion s'étend sur une grande étendue de la trajectoire décrite par le rayon, 3° que cette déviation est différente pour les rayons de différentes couleurs, 4° que les rayons déviés en sens contraire ou par les faces en regard de deux corps, exercent une influence réciproque, 5° qu'une partie des rayons lumineux pénétre dans l'ombre géométrique des corps, 6° que quand les rayons déviés vers l'ombre de deux faces opposées d'un corps se rencontrent, ils exercent l'un sur l'autre une influence réciproque, 7° et qu'enfin tous ces phénomènes sont indépendans de la nature du corps autour duquel la lumière est infléchie.

681. Les phénomènes de la diffraction que nous n'avons fait qu'énoncer, sont complètement inexplicables dans le système de l'émission. Ils se déduisent au contraire avec une extrême facilité du système des ondulations, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

De la Double Réfraction.

682. Tous les corps cristallisés dont la forme primitive n'est ni un tétraèdre ni un octaèdre, jouissent de la propriété de donner deux images des objets vus à travers leur épaisseur: ce phénomène qui indique que les rayons incidens en pénétrant dans leur substance, se divisent en deux, porte le nom de Double Réfraction ; on peut facilement vérifier cette duplication avec un cristal de spath d'Islande.

683. Un des rayons réfractés suit la loi ordinaire de la réfraction simple, et nous le désignerons sous le nom de Rayon Ordinaire; l'autre, qui suit des lois différentes, porte le nom de Rayon Extraordinaire.

684. Les cristaux à double réfraction se divisent en deux classes; dans la première, tous les phénomènes se passent de la même manière autour d'une ligne de cristal qu'on appelle axe principal; dans la chaux carbonatée, cet axe est la ligne qui joint les deux sommets des angles obtus; dans la seconde se trouvent les cristaux à deux axes, c'est-à-dire renfermant deux directions autour desquelles les phénomènes se passent comme autour de l'axe des cristaux de la première classe. Nous ne parlerons ici que des premiers.

685. Dans les cristaux à un axe, tout se passe comme s'il émanait de l'axe du

cristal une force attractive ou répolsive; dans le premier cas, le rayon extraordinaire se rapproche de l'axe; dans le second, il s'en éloigne; de là, la distinction établie par les physiciens qui suivent le système de l'émission, en cristaux à un axe attractif et en cristaux à un axe répulsif.

686. Pour faire concevoir plus nettement la différence qui existe entre la réfraction ordinaire et la réfraction extraordinaire, nous rappellerons que le rayon réfracté conserve toujours la même inclinaison sur la normale, quelle que soit la direction du plan d'incidence, pourvu que l'incidence reste la même; ainsi, en supposant qu'un rayon incident tourne autour de la normale au point d'incidence, en restant toujours incliné de la même quantité, il décrira un cône droit, et les rayons réfractés correspondans seront également disposés sur un cône droit ayant même sommet, même axe, mais dont la nappe serait opposée. Les rayons réfractés extraordinairement et correspondans à toutes ces positions du rayon incident seront aussi disposés sur une surface conique, mais elle sera irrégulière.

687. Il résulte de ce qui précède : 1° que si l'on taille un cristal de manière à lui donner une face perpendiculaire à l'axe, un rayon incident perpendiculaire à cette face n'éprouvera aucune déviation; mais si le rayon est incliné, la déviation du rayon extraordinaire sera la même poor la même incidence, quelle que soit la position du plan incident, et les rayons ordinaires et extraordinaires seront tous deux renfermés dans le plan incident, puisque ce plan renferme l'axe; 2° si on donne au cristal une face parallèle à l'axe, tous les rayons incidens qoi seront dans des plans perpendiculaires à l'axe, donneront des rayons ordinaires et extraordinaires qui seront renfermés dans le plan incident. On a reconnu par l'observation que si dans le même plan perpendiculaire à l'axe on faisait varier l'angle d'incidence, les angles de réfraction extraordinaire variaient en suivant la même loi que le rayon ordinaire, mais l'indice de réfraction était différent (1).

688. Dans les cristaux à deux axes les phénomènes sont beaucoup plus compliqués. M. Fresnel a reconnu qu'aucune portion de la lumière qui les traverse ne s'y réfracte

(1) Huygens a donné une méthode très-simple pour construire le rayon extraordinaire, lorsqu'on connaît les indices n et n' de réfraction ordinaire et extraordinaire. Voici en quoi elle consiste :

Soit S I (*fig.* 46) le rayon incident : par le point I, menons une droite A I B parallèle à l'axe du cristal; sur cette ligne comme axe décrivons un ellipsoïde de révolution dont le rayon de l'équateur A I soit égal à $\frac{1}{n'}$, et l'axe des pôles I O égal à $\frac{1}{n}$; soit I F la trace du plan incident sur la face du cristal; menons dans le plan incident une droite I D perpendiculaire au rayon incident, et une droite F D égale à l'unité et perpendiculaire sur I D, et enfin une ligne T F T' perpendiculaire à la trace F I; si on mène par cette dernière droite un plan tangent à l'ellipsoïde, en joignant le point de tangence E avec le point I, I E sera le rayon extraordinaire. En décrivant une sphère sur le rayon A I, le plan tangent mené par T T' déterminera de la même manière le rayon ordinaire.

suivant la loi de Descartes ; ces deux axes se rencontrent dans le mica, la topaze, le sulfate de chaux, etc.

689. Après avoir décrit les phénomènes généraux de la double réfraction, nous allons indiquer la manière de les observer. Les cristaux qui jouissent de la propriété de doubler les images sont très-nombreux, mais il en est beaucoup dans lesquels les deux rayons réfractés sont si voisins, que pour les distinguer on est obligé de tailler ces cristaux en prisme afin d'augmenter la divergence des rayons émergens. La chaux carbonatée (Spath d'Islande) a une double réfraction très-énergique, et comme cette substance est assez commune, nous la choisirons pour vérifier les faits que nous avons énoncés.

690. *Application à la Chaux carbonatée.* La chaux carbonatée est ordinairement sous la forme d'un rhomboïde A A (*fig.* 47'), incolore, souvent d'une transparence parfaite, et facilement divisible mécaniquement, parallèlement à ses faces ; si l'on place un de ces rhomboïdes sur des caractères d'imprimerie, des points, des lignes tracés sur un papier, on aperçoit deux images distinctes, ce qui indique que les rayons émanés de ces point se divisent en deux en traversant le cristal ; on peut reconnaître directement ce fait en faisant arriver sur un cristal un rayon solaire dans une chambre obscure, et recevant les rayons émergens à leur sortie sur un carton blanc. Pour mesurer l'écartement des deux rayons, on se sert d'un moyen très-simple, imaginé par Malus ; sur une plaque d'ivoire, on grave d'un trait fin et noir un triangle rectangle A B C (*fig.* 48) dont le côté B C est, par exemple, un dixième de A C ; en posant le rhomboïde sur la plaque d'ivoire, pour chaque position de l'œil il se trouvera un point F dans lequel la ligne A' C', image extraordinaire de A C, coupera l'hypothénuse A B de l'image ordinaire ; donc si l'on prend sur le triangle une longueur A F' égale à A' F, le point F' sera celui dont l'image extraordinaire coïncide avec l'image ordinaire du point F considéré comme appartenant à l'hypothénuse A B ; ainsi le rayon ordinaire parti de F et le rayon extraordinaire parti de F' se confondent après leur sortie et ne donnent qu'un seul rayon émergent ; réciproquement un rayon naturel qui serait incident, suivant cette dernière direction, se séparerait en entrant dans le rhomboïde en deux rayons qui passeraient l'un par le point F, l'autre par le point F' ; chacun des côtés A B et A C étant divisé en un grand nombre de parties égales, et la position des côtés du triangle étant connue par rapport aux arètes du prisme, il ne restera plus, pour construire les rayons réfractés, qu'à tracer le point commun d'émergence sur la surface supérieure et la direction du rayon commun d'émergence, ce que l'on peut faire par plusieurs moyens différens.

Lorsqu'on fait tourner le prisme, on remarque qu'il y a deux positions dans lesquelles les rayons réfractés sont dans le plan d'incidence ; cela arrive quand ce dernier

passe par les deux sommets obtus ; il résulte de là que l'axe de réfraction de la chaux carbonatée est la diagonale des deux sommets obtus ; désormais nous désignerons sous le nom de *Section Principale* le plan passant par l'axe et perpendiculaire à la face d'émergence. Lorsque le rayon incident est perpendiculaire, le rayon ordinaire n'éprouve aucune déviation, mais le rayon extraordinaire (*fig.* 47) est rejeté vers le petit angle solide B', ce qui indique que l'axe du cristal est répulsif. Lorsqu'on coupe le cristal perpendiculairement à l'axe (*fig.* 48), un rayon incident perpendiculaire n'éprouve aucune déviation, et on n'obtient qu'une seule image ; mais s'il est incliné, les deux rayons réfractés restent dans le plan d'incidence. Enfin, si on taille le prisme en parallèlipipède rectangle, de manière que A A' (*fig.* 49) soit parallèle à l'axe, on observe que pour tous les plans incidens perpendiculaires à A A', les rayons réfractés restent dans le plan d'incidence, et la réfraction extraordinaire suit alors la loi de Descartes ; c'est ce que l'on peut facilement constater en taillant un prisme triangulaire (*fig.* 50) dont les arètes parallèles entre elles soient en même temps parallèles à l'axe et déterminant l'indice de réfraction, comme pour la réfraction ordinaire ; on trouve pour cet indice un nombre constant, quel que soit l'angle du prisme et celui des rayons incidens. Malus a reconnu que dans la chaux carbonatée l'indice de réfraction ordinaire était de 1,654295, et celui de réfraction extraordinaire de 1,4833015.

691. *Réflexions à la seconde surface des cristaux.* Lorsqu'un rayon se réfléchit à la seconde surface d'un cristal, il se comporte en rentrant dans le cristal comme un rayon naturel venu du dehors, il se divise en deux ; par conséquent, lorsque le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire se réfléchissent ensemble, ils donnent naissance à quatre rayons, deux ordinaires et deux extraordinaires ; mais ils coïncident deux à deux, de sorte que les rayons ordinaires qui s'accompagnent dans leur incidence, s'accompagnent encore dans leur réflexion.

692. *Passage de la lumière à travers plusieurs corps contigus doués de la double réfraction.* Lorsqu'un rayon sort d'un corps qui jouit de la double réfraction, et pénètre dans un autre corps jouissant de la même propriété, la manière dont il se comporte dépend de sa nature et de l'angle des sections principales des deux cristaux. 1° Lorsque les sections principales sont parallèles, quelle que soit d'ailleurs la nature des deux corps, le rayon qui sort du premier, ordinaire ou extraordinaire, n'éprouve aucune bifurcation. 2° Si les sections principales sont à angle droit, chaque rayon reste encore simple ; mais s'il change de réfraction, le rayon ordinaire devient extraordinaire, et réciproquement. 3° Entre ces deux limites, chaque rayon, soit ordinaire soit extraordinaire, se divise en deux en pénétrant dans le second corps ; l'intensité de chaque faisceau dépend de l'angle des deux sections ; elle augmente ou diminue avec cet angle suivant que le mouvement des sections principales éloigne ou rapproche

le faisceau de la limite où il doit s'évanouir. 4° Entre ces limites, les directions des rayons peuvent s'obtenir par la construction suivante : Soit SI (*fig.* 51) un rayon ordinaire, on en déduira le rayon réfracté ordinaire IO par la loi de Descartes, et on calculera le rayon extraordinaire correspondant IE; si le rayon SI est extraordinaire, on commencera par trouver le rayon ordinaire correspondant S'I pour le premier milieu, et on trouvera les rayons ordinaires et extraordinaires que produirait ce dernier : ce seront les rayons produits par le rayon extraordinaire SI.

De la Polarisation de la Lumière.

693. Nous venons de voir que quand les deux faisceaux de lumière qui ont éprouvé l'un la réfraction ordinaire, l'autre la réfraction extraordinaire, passent à travers un second cristal doué de la double réfraction, les deux faisceaux ne se comportent pas de la même manière. Le rayon réfracté ordinairement, se divise en général en deux rayons, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire, qui ont la même intensité lorsque la section principale du second cristal forme un angle de 45° avec celle du premier; pour toutes les autres positions, les deux images ont des intensités inégales; lorsque les sections principales sont parallèles, le rayon extraordinaire s'évanouit, et quand elles sont perpendiculaires, c'est le rayon ordinaire. Le faisceau extraordinaire sorti du premier cristal, présente en traversant le second des effets inverses : son image ordinaire devient nulle quand les sections sont parallèles; elle atteint au contraire son maximum quand les sections principales sont perpendiculaires; c'est alors son image extraordinaire qui disparait. En résumé, chaque faisceau, en passant dans le second cristal, se divise en deux faisceaux qui ont une égale intensité quand les sections principales font un angle de 45°, et n'éprouve qu'un seul mode de réfraction lorsque les sections principales sont parallèles ou perpendiculaires; cette nouvelle réfraction est de même nature dans le premier cas et de nature contraire dans le second. Il est facile de déduire de là que les deux faisceaux se comportent comme les deux faisceaux réfractés ordinairement dans deux rhomboïdes dont les sections principales seraient à angle droit.

694. Ainsi les deux faisceaux réfractés par un rhomboïde de carbonate de chaux, par exemple, diffèrent complètement de la lumière ordinaire, car cette dernière donne toujours deux images en traversant un cristal, tandis que les faisceaux qui ont déjà passé à travers le cristal, en passant à travers un nouveau, dans certaines circonstances ne donnent qu'une seule image. Malus a donné le nom de polarisation de la lumière à cette singulière modification, d'après une hypothèse que Newton avait imaginée pour expliquer ce phénomène et que nous exposerons bientôt. Il a donné le

nom de plan de polarisation à la direction de la section principale du cristal dont le rayon serait émergent ordinairement; ainsi un rayon ordinaire qui sort d'un cristal est polarisé suivant la section principale, et perpendiculairement à cette section s'il est extraordinaire.

695. *Polarisation par réflexion.* Malus a observé le premier que des rayons lumineux pouvaient être polarisés par la réflexion. Si l'on fait tomber sur une glace dépolie et noircie par sa face inférieure des rayons sous une incidence de 35° environ, à compter de la surface, le rayon réfléchi est polarisé dans le plan de réflexion; car si on reçoit ce rayon sur un rhomboïde calcaire, on remarque que les deux rayons réfléchis ne sont d'égale intensité que quand la section principale et le plan de réflexion forment un angle de 45°; quand l'angle est nul, l'image extraordinaire disparaît, et quand l'angle est de 90°, c'est l'image ordinaire qui s'anéantit. Ainsi le rayon réfléchi est dans le même cas que le rayon ordinaire qui sortirait d'un cristal dont la section principale serait parallèle au plan de réflexion. La polarisation complète s'effectue à la surface de l'eau sous 37°, et en général à la surface des corps transparens sous une incidence telle que le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté. La découverte de cette loi est due à M. Brewster; on ne sait pas encore si elle est rigoureuse ou seulement approximative. Dans toutes les autres incidences, la polarisation n'est que partielle, c'est-à-dire que dans la position la plus favorable, une des deux images ne disparaît jamais complètement, mais elle est d'autant plus faible que l'incidence approche davantage de l'angle de polarisation complète; lorsque le rayon est parallèle ou perpendiculaire à la surface, on n'aperçoit plus aucune trace de polarisation.

696. Plusieurs corps opaques qui ne sont pas trop réfringens, tels que le marbre, les vernis noirs, l'obsidienne, etc, polarisent complètement la lumière; d'autres, parfaitement diaphanes ou translucides, mais qui ont un grand pouvoir réfringent, ne la polarisent jamais complètement; tels sont le diamant, le verre d'antimoine; mais de tous les corps, ce sont les métaux qui polarisent le moins la lumière; les incidences qui répondent au maximum de polarisation se rapprochent d'autant plus de la surface que le corps réfléchissant est plus réfringent.

697. *Polarisation par réfraction simple.* Les corps transparens polarisent aussi la lumière par réfraction, et d'autant plus que leur surface est plus inclinée relativement aux rayons; mais la polarisation n'est jamais complète, à moins que l'on ne lui fasse traverser successivement plusieurs plaques parallèles; il en faut d'autant plus qu'elles sont moins inclinées sur les rayons; Malus, à qui on doit la découverte de ce nouveau mode de polarisation, a reconnu que les rayons transmis étaient polarisés dans un sens perpendiculaire à celui des rayons réfléchis. M. Arago a trouvé que la quantité de lumière polarisée par réflexion est toujours égale à celle qui se polarise par réfraction.

698. *Propriétés des Rayons polarisés.* Nous avons vu que quand un rayon polarisé traverse un rhomboïde de spath d'Islande, il ne donne qu'une image quand la section principale est parallèle ou perpendiculaire à son plan de polarisation, qui est l'image ordinaire dans le premier cas, et l'image extraordinaire dans le second, c'est-à-dire toujours l'image dont le plan de polarisation coïncide avec le sien : ainsi un faisceau polarisé suivant un plan quelconque ne peut pas fournir, par une division immédiate, de la lumière polarisée dans un plan perpendiculaire. Il résulte de là, que si on fait arriver sur une glace un rayon incliné sur elle de 35° et déjà polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence, il n'y aura point de rayon réfléchi ; on arrive à la même conséquence en observant que le rayon incident se trouve dans le même cas qu'un rayon ordinaire sortant d'un rhomboïde calcaire, et le rayon réfléchi est identique avec le rayon ordinaire qui se forme dans un deuxième rhomboïde dont la section principale serait perpendiculaire à la première : cette belle découverte est due à Malus ; on peut la vérifier au moyen de l'appareil suivant ; A B (*fig.* 52) représente un tuyau de cuivre mobile autour de la charnière X, aux deux extrémités sont deux tambours qui tournent autour du tuyau, et dont la position est déterminée par les cercles divisés *m n* ; chaque tambour porte deux tiges de cuivre *a b*, *a' b'*, dont le plan répond au zéro de la division des cercles *m n* ; ils supportent l'axe d'un petit cadre *x* mobile, et dont l'inclinaison est mesurée par le quart de cercle divisé *c d*. Lorsqu'on place dans les cadres *x*, *x*, deux petits miroirs de glace noircis sur les faces inférieures, en les inclinant sur l'axe du tuyau de 35°, on peut observer l'anéantissement de la réflexion sur le second miroir, lorsque son plan forme un angle droit avec celui du premier. En remplaçant le second miroir par un rhomboïde calcaire, on peut reconnaître quand sa section principale est perpendiculaire au plan de réflexion, la disparition du rayon ordinaire. Quand on reçoit le rayon polarisé sur une glace inclinée de 35° sur l'axe du tuyau, l'intensité de la lumière réfléchie sur la seconde glace dépend de l'angle formé par les deux plans de réflexion ; si on appelle i cet angle, Malus a reconnu que l'intensité du rayon réfléchi était proportionnelle à $\cos^2 i$. Quand on reçoit le rayon polarisé sur un rhomboïde calcaire, en désignant de même par i l'angle du plan de polarisation du rayon incident avec la section principale, l'intensité de l'image ordinaire sera représentée par $\cos^2 i$, et celle de l'image ordinaire le sera aussi par le carré du cosinus de l'angle formé par le plan de polarisation du rayon incident avec celui du rayon extraordinaire ; or, ce dernier plan étant perpendiculaire à la section principale, l'angle en question sera $90° - i$; par conséquent l'intensité du rayon extraordinaire sera $\sin^2 i$. Il est facile de voir que ces expressions donnent les intensités correspondantes aux différentes limites de position du rhomboïde ; en effet, quand l'angle i est nul, on a $\cos^2 i = 1$ et $\sin^2 i = 0$, et c'est ce qui devait

être, car nous avons vu qu'alors le rayon extraordinaire est nul et le rayon ordinaire est au maximum d'intensité; quand la section principale est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, on a $cos^2 i = o$ et $sin^2 i = 1$, et c'est encore ce que l'on devait obtenir, puisque nous savons que le rayon ordinaire s'évanouit, et que le rayon extraordinaire est à son maximum.

699. Quand un faisceau de lumière polarisée passe à travers un rhomboïde de spath d'Islande dont la section principale est parallèle au plan de polarisation, nous avons vu que l'image extraordinaire s'évanouit : elle reparaît quand on place devant le rhomboïde une plaque cristallisée, douée de la double réfraction et dont la section principale n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan primitif de polarisation, et son intensité devient égale à celle de l'image ordinaire, lorsque la section principale et le plan de polarisation forment un angle de 45°. Si le second cristal est suffisamment épais, les deux images sont blanches; mais quand la lame est très-mince, elles se colorent de teintes complémentaires qui changent de couleur avec l'épaisseur de la lame, et varient seulement d'intensité quand on la fait tourner dans son plan, en la laissant toujours perpendiculaire aux rayons incidens. Cette brillante découverte est due à M. Arago. M. Biot trouva bientôt après que les épaisseurs de deux lames de même nature qui donnaient des teintes quelconques, étaient entre elles comme les épaisseurs des lames d'air qui réfléchissent des teintes semblables dans les anneaux colorés.

§ II.

Explication des Phénomènes dans le système de l'Emission.

700. Newton admet, comme nous l'avons déjà dit, que les corps lumineux lancent dans toutes les directions des molécules d'une tenuité extrême; un rayon de lumière est une suite de molécules qui se meuvent avec une égale vitesse suivant la même direction. La vitesse de chaque molécule est alors la vitesse réelle de la lumière (622).

701. Dans ce système l'ombre formée sur les corps, celle qu'ils projettent derrière eux, les pénombres et le décroissement de l'intensité de la lumière, s'expliquent avec une extrême facilité (619) (624) (623).

702. *Réflexion.* Pour expliquer la réflexion, Newton admet que les molécules lumineuses éprouvent de la part de la substance du corps réflecteur une action répulsive qui ne se manifeste qu'à une distance infiniment petite; soit A B (*fig.* 53) une surface réfléchissante, *m* une molécule lumineuse; si du point *m*, comme centre, on décrit une sphère avec un rayon égal à la distance d'affinité sensible, la molécule *m* sera repoussée par toutes les molécules du corps réflecteur renfermées dans cette sphère; cette dernière ayant un rayon infiniment petit, on pourra considérer

la portion de la surface qui agit sur la molécule lumineuse pendant son mouvement comme étant plane; il en résulte que l'intensité de la force répulsive dépendant seulement de la distance, et la masse attractive étant symétrique par rapport à la normale, la résultante totale des attractions de toutes les molécules matérielles passera par la normale; et comme cette normale ne changera pas sensiblement de direction par le déplacement de la molécule lumineuse, et que la même chose aura lieu tant que la molécule lumineuse sera à une distance des bords du corps plus grande que la distance d'affinité sensible, on déduit évidemment de là : que le rayon lumineux dans sa marche ne sortira pas du plan normal à la surface passant par le rayon incident, puisque ce plan renferme toutes les forces qui sollicitent le rayon lumineux. C'est la première loi de la réflexion.

Pour découvrir la seconde, considérons un rayon de lumière M N (*fig.* 54) arrivant sur une surface A B sous l'incidence θ : soit $a\,b$ la limite de la distance à laquelle s'étendent les forces répulsives. Décomposons au point M la vîtesse du rayon lumineux en deux autres, l'une dirigée suivant la normale et que nous désignerons par v, l'autre parallèlement à A B que nous désignerons par h. Les forces émanées de A B étant verticales, la première vîtesse seule sera altérée pendant que le rayon se rapprochera de A B, et la vîtesse horizontale h restera constante; à mesure que la molécule lumineuse pénétrera dans l'espace A B $a\,b$, sa vîtesse verticale devenant de plus en plus petite, la direction du rayon s'inclinera toujours davantage sur A B et il arrivera une époque où elle sera parallèle à A B, ce sera l'instant où la vîtesse verticale sera nulle; à partir de cet instant, les forces répulsives agissant toujours dans le même sens, rendront à la molécule lumineuse une vîtesse verticale en sens contraire et qui croîtra de telle manière qu'à des distances égales de A B les vîtesses verticales deviendront les mêmes, (c'est un phénomène absolument semblable à celui que nous avons décrit (*fig.* 76); il suit nécessairement de là que la trajectoire curviligne N N' sera symétrique par rapport à la normale $x\,y$, et comme les composantes horizontales et verticales de la molécule aux points N et N' sont égales, il en résulte que les rayons incidens et réfléchis sont également inclinés sur la normale. Il faut remarquer que dans ce système le rayon pourrait pénétrer dans la surface à une certaine profondeur et être encore réfléchi; en effet, soit $a'\,b'$ (*fig.* 55) une surface intérieure et distante de la surface A B d'une quantité égale à la distance de répulsion sensible, soit m une molécule lumineuse qui a traversé la surface A B ; tant que cette molécule n'aura pas atteint $a'\,b'$ elle éprouvera une action répulsive, car si on décrit autour d'elle la sphère de répulsion sensible, il est évident que les forces répulsives des parties x et y se détruisent et qu'il reste celles de la partie z. Ainsi les forces répulsives se manifestent depuis la limite extérieure $a\,b$ jusqu'à la limite intérieure $a'\,b'$, mais elles croissent de $a\,b$ jusqu'à A B, et décroissent de A B

à $a'b'$, et une molécule peut être réfléchie dans tout l'espace compris entre ces limites. Il est évident que pour le même corps la réflexion aura lieu à une distance de AB d'autant plus grande que le rayon sera plus incliné sur la surface, car alors les forces répulsives ont une plus petite composante verticale à détruire.

703. Dans ce système, on conçoit facilement pourquoi la réflexion est d'autant plus abondante que les rayons sont plus inclinés; parce que quelle que soit la faiblesse des forces répulsives, on peut toujours incliner assez les rayons pour rendre les composantes verticales plus petites encore. On rend aussi facilement compte de la réflexion régulière que produisent les corps dépolis sur les rayons très-inclinés (*fig.* 56); c'est qu'alors la réflexion a lieu près de la limite extérieure, que les sommets seuls des aspérités agissent, et qu'étant dirigées dans le même plan, ils agissent comme un plan continu.

704. *Réfraction.* Pour expliquer la réfraction, Newton admet que les corps réfringens exercent sur certaines molécules de la lumière une attraction qui ne se manifeste qu'à des distances extrêmement petites et qui croît à mesure que la distance diminue suivant une loi quelconque, comme les forces répulsives, qui s'exerçant sur d'autres molécules produisent la réflexion. Par les mêmes raisonnemens que nous avons faits pour la réflexion, on trouve que la résultante de ces forces est toujours normale à la surface, du moins tant que la molécule lumineuse est à une distance sensible des bords du corps, et que ces forces doivent se manifester sur une molécule lumineuse dans l'espace ab, ab' (*fig.* 57), ab et ab' étant des surfaces parallèles à AB et distantes de cette dernière d'une quantité égale à la distance d'attraction sensible. Il résulte de là que le rayon incident dans sa marche ne doit pas sortir du plan normal à la surface qui passe par sa direction, puisque ce plan renferme toutes les forces qui sollicitent les molécules lumineuses, et que leurs trajectoires ne sont curvilignes que dans l'espace $ab\ ab'$, au-delà duquel elles continuent à se mouvoir en ligne droite et avec une vitesse constante : c'est la première loi de la réfraction. Quant à la permanence de l'indice de réfraction, on la déduit facilement de ce que la vitesse du rayon lumineux est constante avant son entrée dans la surface ab et après sa sortie de la surface $a'b'$, et de ce que les forces réfractives n'altèrent point la vitesse horizontale du rayon; en effet, soit v la vitesse primitive du rayon lumineux et h la composante horizontale, V la vitesse du rayon lumineux dans le corps après qu'il a traversé la surface ab', h' sa composante horizontale, soit θ et θ' les angles d'incidence et de réfraction; on a évidemment $h = v \sin\theta$ et $h' = V \sin\theta'$; et puisque les composantes horizontales du rayon incident et des rayons réfractés sont égales, on a $\frac{\sin\theta}{\sin\theta'} = \frac{V}{v}$. Ainsi l'indice de réfraction est constant et égal au rapport des vitesses de la lumière dans le corps et dans le vide.

705. *Pouvoirs réfringens.* Les pouvoirs réfringens des corps sont proportionnels à l'intensité des forces accélératrices qui en émanent. Lorsqu'un corps se meut avec une vîtesse uniforme et qu'il reçoit l'action d'une force constante, la mesure de cette dernière est proportionnelle à l'accroissement de vîtesse qui en résulte ; mais quand le corps est soumis à l'action d'une force accélératrice, la mesure de l'intensité de cette dernière est proportionnelle à l'accroissement du carré de la vîtesse, lorsque le corps a parcouru un même espace (1). Ainsi en supposant que la distance d'affinité sensible des corps pour la lumière soit la même pour tous, la distance entre les limites ab et $a'b'$ sera constante ; et en désignant par u l'intensité de la force attractive, on aura $u = V^2 - v^2$, mais on a $V = nv$, donc $u = v^2(n^2 - 1)$. Cette quantité $n^2 - 1$, qui est proportionnelle à u, est ce qu'on nomme le *pouvoir réfringent.*

706. *Décomposition de la lumière par réfraction.* Newton suppose, comme nous

---

(1) Supposons qu'un point m se mouvant evec une vîtesse a soit soumis à une force accélératrice, enalogue à la pesanteur ; en désignant par g le double de l'espace parcouru pendant l'unité de temps, par v la vîtesse après le temps t, par e l'espace parcouru pendant le temps t, nous aurons $v = a + gt$ (74), et $e = ta + \frac{gt^2}{2}$ (75). En résolvant la seconde équation par rapport à t, on trouve $a + gt = \sqrt{a^2 + 2ge}$, d'où $v^2 = a^2 + 2ge$, et $v^2 - a^2 = 2ge$, or $v^2 - a^2$ est l'accroissement du carré de la vîtesse, et g est la mesure de l'intensité de la force accélératrice (87). Par conséquent, l'intensité d'une force accélératrice constante est proportionnelle à l'accroissement du carré de la vîtesse quend e est constant, c'est-à-dire, quand l'espace parcouru reste le même.

Si la force accélératrice n'était pas constante, c'est-à-dire, si les impulsions successivee n'étaient pas égales, on pourrait toujours diviser l'espace $ab\ a'b$ (*fig.* 57) que doit parcourir le point m sous son influence, en un grand nombre de bandes asses rapprochées pour que l'on puisse regarder la force accélératrice comme constante pendant qu'il traverse chacune d'elles ; en appelant v' la vîtesse à la fin de la seconde tranche, v'' le vitesse à la fin de la troisième, etc., V la vitesse finale, e l'épeisseur commune de ces tranches, et g, g', g'', etc., les intensités des forces accélératrices correspondantes à chacune d'elles, on aura $v^2 - a^2 = 2ge$, $v'^2 - v^2 = 2g'e$, $v''^2 - v'^2 = 2g''e$...... $V^2 - v^{(n-1)2} = 2g^{(n-1)}e$ substituent ces valeurs dane la dernière équation il vient $V^2 - v^2 = 2ge + 2g'e + 2g''e + \ldots\ldots\ldots = 2e(g + g' + g'' + \ldots\ldots\ldots)$ Ainsi l'intensité de le force variable est encore proportionnelle à l'accroissement du carré de la vitesse. Nous avons supposé que la force accélératrice agissait dans le sens du mouvement primitif : mais s'il n'en était pas ainsi, la vitesse du point m pourrait toujours être décomposée en deux autres, l'une dirigée dans le sens de la force accélératrice, l'autre perpendiculaire ; cette dernière composante resterait constante et la première seule serait altérée. C'est par conséquent l'accroissement du carré de cette dernière qu'il faudrait considérer ; mais l'accroissement du carré de la vitesse du point lui serait égale, car en appelant a et b les composantes rectangulaires primitives, d^2 l'accroissement du carré d'une des composantes et v et V le vitesse absolue de m avant et après l'ection de le force accéléretrice, on e $v^2 = a^2 + b^2$ et $V^2 = a^2 + b^2 + d^2$, ainsi $V^2 - v^2 = d^2$.

l'avons dit, que les rayons de lumière blanche sont formés de rayons parallèles de couleur variable et inégalement réfrangibles; il en résulte qu'ils sont séparés par tous les corps réfringens, mais ne restent séparés, après leur émergence, qu'autant que la surface de sortie n'est point parallèle à la face d'incidence.

707. *Décomposition de la lumière par les lames minces.* L'explication de ces phénomènes singuliers repose sur la théorie des *accès de facile réflexion et de facile transmission*, que nous allons exposer.

708. Newton admet 1° que toutes les molécules lumineuses reçoivent, à l'instant de leur émission, des dispositions à être facilement réfléchies et réfractées, qui se succèdent alternativement après des temps égaux; or comme la vîtesse de la lumière est uniforme, ces intermitences se succèdent après des chemins parcourus égaux, de sorte que sur la route d'une molécule lumineuse se trouvent des distances égales, entre lesquelles la molécule est successivement dans des dispositions à la réflexion et à la réfraction; ces successions d'état sont désignées sous le nom d'*accès*, la distance parcourue par la molécule entre les retours de deux accès de même nature s'appelle *intervalle des accès*; ces derniers intervalles sont évidemment doubles de la longueur d'un accès; 2° que chaque molécule lumineuse passe d'une manière continue d'un accès à un autre, par la diminution progressive de la faculté réfléchissante ou réfractive; 3° que la longueur des accès varie lorsque la lumière passe perpendiculairement d'un corps dans un autre, suivant le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction; 4° que dans le cas d'une réfraction oblique, les longueurs des accès varient suivant une loi dont il a donné l'expression analytique; 5° que quand des rayons lumineux se réfléchissent à la seconde surface d'un corps, ils reprennent, après la réflexion et à partir de la surface réfléchissante, de nouveaux accès, dont les longueurs sont les mêmes que, si venant du milieu extérieur, ils étaient entrés avec l'obliquité que leur imprime la réflexion; 6° que les accès des rayons varient avec leurs couleurs: ils sont pour le rayon rouge extrême, pour la limite de l'orangé et du rouge, du jaune et de l'orangé, du vert et du jaune, du bleu et du vert, de l'indigo et du bleu, du violet et de l'indigo, et pour le violet extrême, proportionnels aux racines cubiques des nombres 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{9}{16}$, $\frac{1}{2}$.

709. Au moyen de ces hypothèses, qui ne sont que l'expression fidèle des phénomènes que présentent les anneaux colorés lorsqu'on admet le système de l'émission, on les explique avec la plus grande précision. C'est ce que nous allons indiquer sommairement.

Concevons un faisceau de lumière homogène, frappant la surface d'un corps réfringent; toutes les molécules ont des accès de même longueur; mais ils seront coupés par la surface du corps dans toutes les différentes parties d'accès de facile transmission et de facile réflexion; les molécules se diviseront alors en deux parties,

les unes seront réfléchies et les autres seront réfractées, suivant la nature des accès dans lesquels elles se trouveront. Si nous supposons que le pouvoir réfléchissant du corps soit très-grand, de manière que les molécules qui se trouvent au commencement et à la fin des accès de facile réflexion soient réfléchies, toutes les molécules réfractées seront à leur entrée dans un accès de facile transmission, mais elles seront dans des parties différentes de ces accès; les accès se renouvelant périodiquement dans l'intérieur du corps, il est évident qu'à une distance de la surface réfringente égale à 1, 2, 3, 4, etc., longueurs d'accès, toutes les molécules se trouveront alternativement dans un accès de facile réflexion et de facile transmission; les lignes noires (*fig.* 58) représentent les accès de facile transmission et les lignes ponctuées les accès de facile réflexion. Il résulte évidemment de là que si le corps avait pour épaisseur un multiple de la longueur d'un accès par un nombre pair, à la seconde surface du corps, les molécules lumineuses seraient toutes transmises, et qu'elles seraient au contraire toutes réfléchies, si ce multiple était un nombre impair. Par conséquent, si la seconde surface du corps est inclinée sur la première, (*fig.* 59) en prenant des points a, b, a', b', a'', b'', tels que les distances de ces points à la surface supérieure soient égales à 1, 2, 3, 4, etc., longueurs d'accès, aux points a, a', a'', etc., la lumière sera réfléchie en totalité, et aux points b, b', b'', etc., la lumière sera au contraire entièrement transmise; ainsi, lorsqu'on recevra la lumière réfléchie, on verra une série de bandes alternativement noires et colorées; O, b, b', etc., seront les centres des bandes noires, a, a', a'' les centres des bandes brillantes, et ce sera le contraire quand on recevra la lumière réfractée. Si la lumière était parfaitement homogène, on devrait apercevoir ces franges à toutes les épaisseurs; mais comme la lumière la plus simplifiée renferme encore des molécules dont les accès n'ont pas exactement la même longueur, il en résulte que l'on obtient plusieurs systèmes de bandes superposées, et qui, quelque peu différentes l'une de l'autre qu'on puisse les supposer, finissent toujours, lorsqu'elles sont éloignées de leur origine, par se détruire mutuellement, parce que les bandes brillantes de l'une finissent par coïncider avec les bandes obscures de l'autre. Quand on emploie de la lumière blanche, on obtient de même une série de bandes dont les parties éclairées ont des teintes différentes et d'inégales largeurs; près de leur origine, les bandes brillantes peu reculées les unes des autres, produisent des bandes irisées très-distinctes; mais à mesure qu'elles s'éloignent, les bandes brillantes et obscures se mêlent et ne produisent plus qu'une lumière uniforme.

710. *Polarisation.* Dans le système de l'émission, on admet que les molécules lumineuses polarisées ont leurs axes semblables dirigés dans un même plan, qui est celui de polarisation. Pour expliquer la polarisation colorée (699), M. Biot avait admis que quand un rayon polarisé traverse une lame mince douée de la double réfraction, dont

la section principale n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan primitif de polarisation, la molécule lumineuse est polarisée suivant un plan variable. Mais cette hypothèse, que M. Biot avait cru devoir conclure de ses observations, ne paraît point exacte; car, d'après les expériences de M. Fresnel, les lames minces cristallisées agissent comme les lames épaisses.

711. *Diffraction.* Ces phénomènes sont complètement inexplicables dans le système de l'émission.

712. *Couleurs propres des Corps.* Dans le système de l'émission, la lumière blanche est formée de rayons de toutes les couleurs. Les corps non lumineux par eux-mêmes, ne sont visibles que par la lumière qu'ils réfléchissent ou réfractent; lorsque les corps réfléchissent ou réfractent également tous les rayons colorés, ils sont blancs; lorsqu'ils les absorbent tous, ils paraissent noirs; lorsqu'ils absorbent certains rayons et réfléchissent ou réfractent les autres, ou absorbent inégalement les rayons de nature différente, ils ont la teinte qui résulte du mélange des rayons réfléchis ou réfractés. Ainsi la couleur des corps est dans la lumière qu'ils reçoivent. On peut le démontrer par des expériences bien simples : si après avoir formé un spectre solaire dans une chambre obscure, on en sépare un rayon, tous les corps plongés dans ce rayon en prennent la teinte, quelle que soit d'ailleurs celle qu'ils ont dans la lumière blanche. On conçoit d'après cela pourquoi certaines couleurs disparaissent à la lumière des lampes ou des bougies; c'est que ces teintes n'existent pas dans nos lumières artificielles, qui ne sont jamais parfaitement blanches.

Reste à expliquer comment les corps agissent d'une manière si inégale sur les différens rayons qui composent la lumière blanche. Newton a rattaché ces phénomènes à ceux des anneaux colorés, d'une manière très-ingénieuse; il considère les corps comme composés de groupes de molécules très-éloignés les uns des autres, de sorte que la densité et le pouvoir réfringent de chaque groupe est beaucoup plus considérable que celui des corps; alors quand un faisceau de lumière blanche vient rencontrer un corps, les rayons qui pénètrent les groupes éprouvent un grand raccourcissement dans leur accès, de sorte que quand ils arrivent à la surface inférieure, il y a des molécules lumineuses dans des accès de facile transmission et de facile réflexion; ces dernières sont réfléchies et forment la couleur du corps, dont la teinte dépend du pouvoir réfringent des groupes de molécules et de leurs épaisseurs; les groupes qui sont au-dessous des premiers, en agissant de la même manière sur les rayons qui passent à travers les premiers, peuvent aussi concourir à augmenter l'intensité de la teinte du corps vu par réflexion. Quant aux couleurs des corps vus par réfraction, leur teinte est formée des rayons échappés à la réflexion. Dans cette théorie, la couleur des corps opaques devrait toujours être une de celle des anneaux colorés, et pour les corps transparens, leurs couleurs par réflexion

et par réfraction devraient être complémentaires; mais aucune de ces deux conséquences n'est constamment d'accord avec l'expérience; il est rare que la teinte d'un corps opaque soit exactement une de celles des anneaux colorés, et il est plus rare encore que les teintes par réflexion et par réfraction soient complémentaires; pour rendre compte de cette anomalie, Newton admet que les corps ont le pouvoir d'éteindre les rayons colorés qui les traversent, et que cette faculté n'est pas la même pour tous les rayons différemment colorés; d'où il résulte que les teintes réfléchies et réfractées se composent de celles qui sont réfléchies ou réfractées dans les groupes de molécules modifiées par l'absorption de certains rayons pendant le retour à la première surface, ou dans le chemin parcouru pour arriver à la seconde.

Mais cette dernière supposition est précisément ce qu'il faudrait expliquer; car il est bien démontré que la couleur des corps est dans la lumière qu'ils reçoivent, et qu'ils ne paraissent d'une teinte différente du blanc, que parce qu'ils éteignent certains rayons colorés; par conséquent, toute la difficulté de la question est de savoir pourquoi les corps absorbent certains rayons et sont sans action sur les autres.

§ III.

Explication des Phénomènes dans le système des Ondulations.

713. Le système des ondulations a été imaginé par Descartes, et plus habilement suivi dans ses conséquences mathématiques par Huyghens et Euler. Le système de l'émission, soutenu par le nom de Newton, l'avait fait abandonner; mais récemment le docteur Thomas Young et M. Fresnel l'ont examiné de nouveau; les belles découvertes de ces deux célèbres physiciens, et surtout celles de ce dernier, ont porté dans ce système une clarté qui lui donne un haut degré de probabilité. Tous les détails que nous allons donner sont tirés des différens mémoires de M. Fresnel.

714. Dans le système des ondulations, on admet que l'espace est rempli d'un fluide subtil et élastique désigné sous le nom d'*éther*. La lumière consiste dans les vibrations de l'éther qui se propagent dans ce fluide comme les ondes sonores dans l'air. Les corps lumineux émettent de la lumière en communiquant leurs vibrations à l'éther environnant, ainsi ils produisent la lumière comme les corps sonores produisent le son. La sensation de la lumière résulte du choc des ondes lumineuses sur l'organe de la vision, l'intensité de la lumière est proportionnelle à celle des vibrations des ondes, et la sensation des couleurs dépend de la longueur des ondes; ces vibrations sont perceptibles pour nous dans certaines limites de vitesse, mais les animaux peuvent avoir des limites différentes dépendant de la nature de leurs organes; ainsi les sensations des couleurs sont parfaitement semblables à celles des sons.

715. *Nature et propagation des Ondes.* Les vibrations des molécules d'un corps lumineux peuvent être considérées comme celles d'un pendule. Elles tendent successivement à condenser et à dilater les couches d'éther qui sont en contact avec elles, et ces effets se propagent de proche en proche dans les couches suivantes. On appelle *onde*, l'étendue de l'éther ébranlée par une oscillation complète du corps lumineux; elle est évidemment composée de deux parties égales, dont l'une est condensée et l'autre est dilatée. La longueur de l'onde est égale à la vitesse de propagation du mouvement dans l'éther, multipliée par la durée d'une vibration du corps lumineux. Lorsque le mouvement oscillatoire est continu, les ondes successives se meuvent à la suite les unes des autres. Les oscillations du corps lumineux peuvent être de même durée et avoir des amplitudes très-différentes, alors les ondes ont la même longueur; mais l'amplitude des oscillations élémentaires est différente. Les ondes peuvent encore avoir des longueurs différentes, puisqu'elles dépendent de la durée de chaque vibration du corps lumineux.

716. D'après cette manière d'envisager la génération des ondes, les mouvemens sont parallèles à la direction de propagation, et dans chaque moitié de l'onde les mouvemens sont en sens contraire. Les phénomènes de la polarisation et de la double réfraction ont conduit M. Fresnel à admettre dans les ondes des mouvemens parallèles à leur direction, c'est-à-dire perpendiculaires à la direction de propagation; pour admettre cette dernière hypothèse, il faut examiner comment de pareils mouvemens peuvent se propager dans l'éther, et comment les vibrations des corps lumineux peuvent leur donner naissance. Pour concevoir comment ces mouvemens peuvent se propager, il faut considérer l'éther comme composé de points matériels éloignés les uns des autres et doués d'une action répulsive; dans l'état d'équilibre, ces points doivent avoir des positions relatives déterminées : considérons trois files de molécules parallèles et indéfinies; toutes les molécules doivent être également espacées et celles de la rangée intermédiaire seront probablement placées entre celles des rangées extrêmes. Mais quelles que soient les positions relatives, elles sont nécessaires à l'existence de l'équilibre, et si on fait glisser la rangée moyenne sur elle-même d'une quantité très-petite, les rangées extrêmes devront suivre ce mouvement qui se propagera dans toutes celles que l'on supposera au-delà; ce ne serait que dans le cas où le mouvement aurait été assez considérable pour qu'une molécule vînt occuper la place de la suivante, que l'équilibre subsisterait sans aucun mouvement des files voisines. Pour expliquer comment il peut arriver que les molécules du fluide ne reçoivent de la part des molécules des corps lumineux que des oscillations parallèles aux ondes, il faut admettre : 1° que la force qui serait nécessaire pour rapprocher deux tranches consécutives, est beaucoup plus grande que celle qu'il faudrait employer pour les faire glisser les unes sur les autres; 2° que les oscillations des corps lumineux ont des vitesses infiniment plus petites que celle avec laquelle les condensations et les dilatations se trans-

mettent dans le fluide. En effet, les condensations et les dilatations se propageant avec une très-grande vîtesse, l'équilibre de pression se rétablira à chaque instant autour du corps vibrant entre la partie du fluide qu'il tend à chaque instant à condenser et à dilater. Ainsi les principaux mouvemens qui se développeront dans les couches fluides, seront parallèles an corps vibrant. Nous considérerons donc la lumière directe comme formée d'une succession rapide d'ondes, dans lesquelles les mouvemens oscillatoires sont parallèles à leur direction, et disposés dans tous les sens, mais dans les deux moitiés d'une même onde, les mouvemens sont contraires. Cela posé, il est facile de se rendre compte de tous les phénomènes que présente la lumière et de trouver *à priori* toutes les lois reconnues par l'expérience.

717. *Intensité de la Lumière.* Un rayon lumineux est la ligne qui joint le centre d'ébranlement avec un point quelconque de l'onde. L'intensité de la lumière doit être mesurée par la force vive (175), c'est-à-dire, par le carré de la vîtesse du mouvement oscillatoire multipliée par la densité; or le mouvement oscillatoire diminue à mesure qu'il se communique à des couches plus étendues; le calcul démontre que ces vîtesses sont en raison inverse de la distance au centre d'ébranlement, par conséquent, dans un milieu homogène la lumière décroît en raison inverse du carré de la distance. Il résulte de là, que la somme des forces vives d'une même onde reste constante pendant son mouvement dans un milieu homogène; car la largeur de l'onde reste toujours la même, son étendue croît comme le carré des distances, et la vîtesse en raison inverse de ce même carré. Au reste, c'est un principe général de la propagation des ondes dans les fluides élastiques. On voit d'après cela, que si le lieu d'ébranlement était un point, toutes les sphères décrites de ce point, comme centre, recevraient la même quantité de lumière.

718. *Principes des Interférences.* On désigne ainsi les phénomènes qui résultent de la superposition de deux systèmes d'ondes. Supposons d'abord deux systèmes d'ondes de même grandeur et parallèles: s'ils sont partis ensemble du centre d'ébranlement, les portions de chaque onde dans lesquelles les mouvemens sont de même signe coïncidant, se renforceront mutuellement, et l'intensité de la lumière est augmentée; il en sera encore de même si l'une des ondes est en retard d'un nombre quelconque d'ondulations entières; mais si le retard est d'un nombre impair de demi-ondulations, les portions des ondes superposées ayant des mouvemens oscillatoires contraires se détruiront mutuellement, et par conséquent il ne se manifestera point de lumière dans toute l'étendue de la superposition; ainsi en désignant par d l'épaisseur d'une onde, deux systèmes d'ondes parallèles produisent le *maximum* de lumière, lorsque la différence de chemin parcouru par chaque système, à partir du centre d'ébranlement, est égal à d, $2d$, $3d$, etc., et il y a destruction des ondes quand cette différence de chemin est égale à $\frac{1}{2}d$, $\frac{3}{2}d$, $\frac{5}{2}d$, etc.

719. Quand les deux systèmes d'ondes ne sont pas parallèles, chaque onde est divisée en parties égales, dans lesquelles les mouvemens sont alternativement détruits et renforcés, et qui, par conséquent, sont alternativement obscures et lumineuses. C'est ce que nous allons faire voir en décrivant la belle expérience de M. Fresnel.

720. Soit ED et DF (*fig.* 60) deux miroirs plans métalliques ou de glaces noircis intérieurement, réunis en D sous un angle très-voisin de 180°, et S un point lumineux. L'appareil étant placé dans une chambre obscure, et le point lumineux étant le foyer d'une lentille qui concentre des rayons solaires sensiblement homogènes, tels, par exemple, que ceux que laissent passer certains verres colorés; en recevant la lumière refléchie sur un carton blanc, on remarque que l'image est formée de bandes parallèles alternativement brillantes et obscures, à égale distance les unes des autres, dirigées perpendiculairement à la ligne qui joint les deux images des points lumineux; la bande centrale est très-brillante, elle est placée entre deux bandes obscures, du noir le plus foncé; mais à mesure que les bandes s'écartent du centre, leur vivacité diminue. Ce phénomène a lieu quelle que soit la teinte de la lumière, mais les largeurs des bandes sont différentes; la lumière blanche donne des bandes irisées par la superposition des bandes des différentes couleurs. En employant de la lumière blanche, la vivacité des bandes décroît à mesure qu'on s'éloigne du centre de l'image, à cause de l'empiétement toujours croissant des bandes brillantes et obscures les unes sur les autres. Le même phénomène a lieu quand on emploie de la lumière aussi homogène que possible, parce qu'elle renferme toujours des rayons qui produisent des franges inégales; mais comme ces différences sont beaucoup plus petites que pour la lumière blanche, les franges distinctes sont bien plus nombreuses. Si on intercepte par un écran la lumière d'un des miroirs, les franges disparaissent. Si on calcule les chemins parcourus par les deux faisceaux lumineux pour arriver au milieu des bandes, on trouve : 1° que la bande brillante centrale correspond à des chemins égaux; 2° qu'en désignant par d la différence de chemins parcourus par les deux faisceaux de rayons, qui se réunissent au milieu de la bande brillante située à droite ou à gauche de la bande centrale, les milieux des autres bandes brillantes répondent à des différences de chemin égales à $2d$, $3d$, $4d$, etc.; 3° que les milieux des bandes obscures répondent à des différences de chemin égales à $\frac{1}{2}d$, $\frac{3}{2}d$, $\frac{5}{2}d$, $\frac{7}{2}d$, etc. La valeur de d varie pour la couleur des rayons; pour chacun, elle est quatre fois plus grande que la longueur des accès de Newton; nous en verrons bientôt la raison.

Pour que l'expérience que nous venons de rapporter réussisse, il y a plusieurs conditions indispensables; il faut : 1° que l'angle des deux miroirs diffère peu de 180°; 2° que les miroirs ne saillent pas l'un sur l'autre dans la ligne de contact; une saillie d'un ou deux centièmes de millimètres suffit pour empêcher l'apparition des franges; 3° on ne doit employer que la lumière d'un seul point. Nous avons dit que l'on recevait

l'image sur un carton blanc ; mais on les observe beaucoup mieux en les regardant dans l'espace où elles se forment, avec une loupe d'un court foyer.

721. Ces phénomènes s'expliquent d'une manière très-simple dans le système des ondulations; en effet, si du point S on abaisse deux perpendiculaires SQ et SP sur les deux miroirs, et qu'on prenne $BQ = SQ$ et $PA = SP$, les rayons réfléchis sur les deux miroirs étant prolongés iront passer par les points A et B (628). On pourra donc ne pas avoir égard aux deux miroirs, et considérer les rayons comme émanant des points A et B ; les chemins parcourus seront les mêmes, car, d'après les constructions précédentes, pour deux rayons quelconques SG et SH, on a $SGb = BGb$ et $SHb = AHb$. Les deux systèmes d'ondes pouvant être considérés comme émanant des points A et B, seront terminés par des surfaces sphériques ayant pour centres les points A et B. Elles sont représentées dans la figure par des arcs de cercles décrits des points A et B ; leur distance est égale à ½ ondulation, les arcs en lignes pleines et les arcs ponctués représentent les lieux des molécules éthérées douées du *maximum* de mouvemens contraires; il résulte de cette disposition, que les intersections des lignes pleines avec les lignes ponctuées sont des points de discordance complète, et par conséquent des points obscurs, tandis que les intersections des lignes de même nature sont des points d'accord parfait, et par conséquent qui donnent le *maximum* de lumière; en joignant par les lignes br, $b'r'$, etc. les intersections de même espèce, et par les lignes no, $n'o'$, les intersections de nature contraire, on aura deux systèmes de lignes, dont les premieres seront les centres d'autant de bandes lumineuses, et les secondes d'autant de bandes obscures existantes dans l'espace et dirigées dans le sens du mouvement des ondes. On voit facilement, à l'inspection de la figure, que les centres des bandes sont également distans, et que les différences de chemins sont o, d, $2d$, etc., pour les bandes brillantes, $\frac{1}{2}d$, $\frac{3}{2}d$, $\frac{5}{2}d$, etc., pour les bandes obscures (1).

722. On reconnaît aussi, à l'inspection de la figure, que les deux miroirs doivent être presque dans le même plan. En effet, le point n sera d'autant plus éloigné du point b, que l'angle bni sera plus petit ; or cet angle est égal à celui du miroir DE avec le prolongement de l'autre. Il est facile aussi de concevoir la nécessité d'employer de la

(1) La largeur des franges, c'est-à-dire la distance des centres de deux bandes brillantes ou obscures consécutives, dépend de la longueur d'ondulation et de l'angle sous lequel se croisent les rayons. En effet, le triangle bni peut être considéré comme rectiligne et isocèle, à cause de la petitesse des arcs ; et le sinus de l'angle bni est sensiblement égal à $\frac{ib}{bn}$, ainsi $bn = \frac{ib}{\sin bni}$; mais l'angle bni ayant ses côtés perpendiculaires à ceux de l'angle AbB, lui est égal ; en le désignant par i, on a $bn = \frac{ib}{\sin i}$, ou $2\,bn = \frac{2\,ib}{\sin i}$; mais nn' distance des milieux de deux bandes obscures est égal à $2\,bn$, par conséquent $nn' = \frac{2\,ib}{\sin i}$.

lumière émanant d'un même point; car si on changeait tant soit peu la position du point lumineux, celle des points A et B varierait également, le milieu de la bande centrale serait déplacé, ainsi que tout le système des franges; par conséquent, si le corps éclairé avait de certaines dimensions, chaque point donnant un système de franges, et chacun d'eux ayant des positions différentes, les franges empiéteraient les unes sur les autres et s'effaceraient mutuellement.

723. Une autre condition nécessaire à la manifestation des interférences et dont nous n'avons point encore parlé, c'est que les deux faisceaux soient sortis d'une source commune. La raison en est facile à saisir; en effet, les particules des corps lumineux doivent éprouver de fréquentes perturbations dans leurs oscillations, en raison des changemens rapides qui s'opèrent autour d'elles; or on ne peut supposer que ces perturbations s'opèrent simultanément et de la même manière dans des particules séparées et indépendantes; par conséquent, deux systèmes d'ondes parties de deux sources différentes éprouveront, dans leurs interférences, des anomalies qui en feront disparaître la régularité, et comme il est très-probable que la sensation de la lumière n'est pas produite par une seule onde, mais par la succession régulière de plusieurs ondes semblables, de même que la sensation du son, deux systèmes d'ondes parties de deux sources différentes ne produiront qu'une sensation uniforme.

724. *Diffraction.* La théorie de la diffraction repose sur le principe des interférences et sur le principe d'Huyghens, que l'on peut énoncer ainsi : *Les vibrations d'une onde lumineuse, en chacun de ses points, peuvent être regardées comme résultant des mouvemens élémentaires qu'y enverraient au même instant, en agissant isolément, toutes les parties de cette onde considérée dans l'une quelconque de ses positions antérieures.* C'est une conséquence du principe général de la coexistence des petits mouvemens. Il résulte de ce principe, que l'intensité de l'onde primitive étant uniforme, cette uniformité se conservera pendant toute sa marche, si aucune portion de l'onde n'est interceptée ou retardée; mais si une portion de l'onde est arrêtée par l'interposition d'un corps opaque, alors l'intensité de chaque point des ondes suivantes variera avec sa distance aux bords de l'ombre, et ces variations seront surtout sensibles dans le voisinage des rayons tangens.

En effet, chaque point d'une onde envoie des rayons élémentaires dans toutes les directions; mais ceux qui sont dirigés perpendiculairement à la surface des ondes, doivent avoir beaucoup plus d'intensité que les autres. Soit C (*fig.* 61) un point lumineux, AG un écran; considérons l'onde AME arrivée en A: pour avoir l'intensité de cette onde au point P dans l'une quelconque de ses positions suivantes, il faudrait chercher la résultante de toutes les ondes élémentaires que chacune des portions de l'onde primitive y enverrait en agissant isolément. L'intensité des ondes envoyées au point P doit varier avec leur obliquité, et il serait probablement très-difficile d'en trouver

la loi; mais si on considère l'onde BP, éloignée de l'onde AME d'un grand nombre d'ondulations, les seuls rayons élémentaires envoyés au point P qui y exerçent une influence sensible, sont tous voisins de la normale, et par conséquent peu différens en intensité. En effet, considérons les rayons sensiblement inclinés EP, FP, IP; on peut toujours prendre les arcs EF et FI d'une longueur telle que les différences EP — FP et FP — IP soient égales à une demi-ondulation: à cause de l'obliqoité prononcée des rayons et de la petitesse d'une demi-ondulation par rapport à leur longueur, ces deux arcs sont presque égaux, et les rayons qu'ils envoient au point P sensiblement parallèles; en sorte qu'en raison de la différence d'une demi-ondulation qui existe entre les rayons correspondans des deux arcs, leurs effets se détruisent mutuellement.

725. On voit, d'après cela, que quand les ondes lumineuses sont interceptées par un corps opaque, la ligne de démarcation d'ombre et de lumière doit peu différer de la surface conique menée par le point lumineux, et qui serait tangente aux bords du corps.

726. Quand l'écran a une largeur suffisante, en calculant pour chaque point P, P', etc., l'intensité de la lumière, on trouve 1° que l'intensité de la lumière décroît rapidement en dedans de l'onde à partir du plan tangent CAB; 2° qu'au dehors de l'ombre il se présente plusieurs *maxima* et *minima* qui correspondent à autant de franges obscures et brillantes; 3° qu'aucun *minimum* n'est égal à zéro, et que leurs différences d'intensité diminuent à mesure qu'on s'éloigne de l'ombre; 4° que les intervalles compris entre ces *minima* et ces *maxima* diminuent à mesure qu'on s'éloigne de l'ombre, et suivant des nombres qui ne changent pas à quelque distance qu'on mesure les franges; 5° que ces *maxima* et *minima* sont placés sur des hyperboles dont les foyers sont le bord de l'écran et le point lumineux.

727. Quand l'écran est un corps mince et étroit, il faut tenir compte de la lumière infléchie de chaque côté; leur interférence produit dans l'ombre du corps les mêmes effets que la lumière réfléchie sur les deux miroirs inclinés (720).

728. Quand la lumière passe à travers une fente étroite, il faut chercher l'action de toutes les ondes élémentaires qui émanent de l'onde primitive comprise dans la largeur de l'ouverture. On trouve aussi l'accord le plus satisfaisant avec les faits observés.

729. *Phénomènes des Anneaux colorés.* Les anneaux colorés produits par réflexion résultent des interférences des rayons réfléchis à la première et à la seconde surface de la lame mince; le second système d'ondes se trouve en retard sur le premier du double de l'épaisseur, et suivant que cette longueur est égale à un nombre pair ou à un nombre impair de demi-ondulations, la lumière est apparente ou anéantie. Mais en calculant le chemin parcouru, on trouve le contraire de l'observation, c'est-à-dire, quand le calcul indique manifestation de lumière, il y a absorption, et

réciproquement ; cela tient à un principe général du mouvement des fluides, que M. Poisson a démontré, et qui consiste en ce que toutes les fois que le mouvement d'un fluide se transmet à un autre plus ou moins dense, le mouvement que conserve le premier après le choc est de nature contraire. Ainsi quand les ondes se réfléchissent en dedans ou en dehors du milieu le plus dense, la vîtesse d'ondulation change de signe ; il en résulte que quand les différences de chemin indiqueront un accord parfait, il y aura au contraire discordance, et réciproquement ; ainsi les anneaux obscurs répondront à des épaisseurs o, $\frac{1}{2}$ d, $\frac{3}{2}$ d, 2 d, $\frac{5}{2}$ d, etc., et les anneaux brillans aux épaisseurs $\frac{1}{4}$ d, $\frac{3}{4}$ d, $\frac{5}{4}$ d, $\frac{7}{4}$ d, etc., puisque l'épaisseur est la moitié du retard des ondes. En multipliant ces nombres par 4, on trouve les séries o, 2, 4, 6, 8, etc., et 1, 3, 5, 7, 9, etc., que nous connaissons déjà.

Quant aux anneaux beaucoup plus faibles, vus par réfraction, M. Young a démontré qu'ils résultent de l'interférence des rayons transmis directement avec ceux qui ne l'ont été qu'après deux réflexions consécutives dans la lame mince ; le calcul indique qu'ils doivent être faibles et complémentaires des premiers.

Nous avons dit que les longueurs d'ondulations étaient quatre fois plus grandes que les accès calculés par Newton ; en effet, les épaisseurs des lames correspondantes aux anneaux réfléchis, sont $\frac{1}{4}$d, $\frac{3}{4}$d, etc., et suivant Newton, elles sont de 1, 3, 5, etc., longueurs d'accès. Il résulte de là, que pour avoir les longueurs d'ondulations des différens rayons colorés, il suffit de multiplier par 4 les longueurs des accès. C'est ainsi qu'on a formé le tableau suivant ; l'unité est un millimètre.

LIMITES des COULEURS PRINCIPALES.	VALEURS EXTRÊMES de *d*.	COULEURS PRINCIPALES.	VALEURS MOYENNES de *d*.
	mm		mm
Violet extrême	0,000406	Violet	0,000423
Violet indigo	0,000439	Indigo	0,000449
Indigo bleu	0,000459	Bleu	0,000475
Bleu vert	0,000492	Vert	0,000512
Vert jaune	0,000532	Jaune	0,000551
Jauoe orangé	0,000571	Oraogé	0,000583
Orangé rouge	0,000596	Rouge	0,000620
Rouge extrême	0,000645		

730. *Réflexion et Réfraction.* Lorsqu'un système d'ondes vient frapper la surface d'un corps transparent, une partie du mouvement vibratoire est réfléchie à la surface

de contact des deux milieux, l'autre est transmise et se propage dans le second milieu; il s'agit d'examiner suivant quelle loi ces mouvemens sont dirigés dans l'un et l'autre cas.

731. Soit ED et FG (*fig.* 62) deux rayons parallèles partis d'un même centre d'ondulation: GI, perpendiculaire sur ces deux rayons, sera la surface de l'onde; d'après le principe d'Huyghens, on peut considérer les points G et D comme des centres d'ébranlement qui, en agissant isolément, enverraient dans tous les sens des rayons d'intensité différente; les vibrations résultantes de la réunion des rayons élémentaires partis des points G et D et qui peuvent subsister, doivent évidemment satisfaire aux conditions suivantes: 1° les rayons élémentaires doivent être parallèles, car alors ils auront la même intensité et la même direction de mouvement vibratoire; 2° les chemins parcourus d'une surface de l'onde incidente à une surface de l'onde réfléchie doivent être égaux, afin que les rayons ne se détruisent pas par leurs interférences; ces conditions suffisent pour les déterminer. En effet, soit GK et DL les deux rayons réfléchis, DC perpendiculaire commune à ces deux rayons sera l'onde réfléchie; il faut, pour satisfaire à la seconde condition, que ID = GC, et par conséquent que l'angle EDA soit égal à l'angle KGB. Les rayons qui pourraient se propager sous d'autres directions se détruisent mutuellement par l'opposition de leurs ondes; mais près des bords du corps, où la neutralisation de ces ondes n'est plus complète, les rayons ne sont plus assujettis dans leur marche à la loi ordinaire. En effet, si on mène deux autres rayons G*k* et D*l*, G*c* ne sera plus égal à ID et on pourra toujours prendre GD, tel que la différence des chemins soit égale à une demi-ondulation, alors les deux rayons G*k* et D*l* se détruiront mutuellement. Mais on conçoit que si on supprime D*l*, la neutralisation n'aura plus lieu et que le rayon G*k* deviendra visible. En général les rayons émanés du point D sous une incidence plus grande ou plus petite que celle de la réflexion régulière, sont détruits par les rayons parallèles situés à droite et à gauche et qui partent de points d'autant plus voisins du point D que leur obliquité est plus grande; par conséquent, quand les deux bords du miroir sont très-éloignés, il n'y a qu'une très-petite largeur des bords dont les rayons puissent dévier, et ils ont une très-faible intensité, car ils sont en partie neutralisés par ceux de même inclinaison qui partent des points précédens; mais à mesure que la largeur du miroir devient plus petite, cette neutralisation est moins complète, et le faisceau réfléchi devient plus divergent. C'est ce que M. Fresnel a vérifié par l'observation que nous allons rapporter; si on colle sur un miroir métallique plusieurs bandes de papier noir, de manière à ne laisser à découvert qu'un espace triangulaire très-aigu, en éclairant cet espace par des rayons solaires et recevant l'image sur un carton à une grande distance, cette image paraît plus large dans les points correspondans aux

parties les plus étroites du miroir; par conséqnent, la divergence des rayons est d'autant plus grande que l'espace réfléchissant est plus étroit.

732. Quant à la réfraction, les mêmes conditions déterminent le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction. En effet, soit A B (*fig.* 63) la surface réfringente, E D et F G deux rayons incidens : les rayons réfractés G K et D L devront être parallèles, et les chemins parcourus depuis l'onde incidente G I jusqu'à l'onde réfractée D M devront l'être dans le même temps, afin que les ondes ne soient pas en discordance; par conséquent, en désignant par v et v' la vitesse de la lumière dans le milieu extérieur et dans le corps, on aura la proportion G M : D I :: v' : v, or G M et D I sont les cosinus des angles que forment les rayons incidens et réfléchis avec la surface du corps, ou les sinus des angles qu'ils forment avec la normale; par conséquent, le sinus de l'angle d'incidence est au sinus de l'angle de réfraction comme la vitesse de la lumière dans le premier milieu est à la vitesse dans le second milieu. Cette loi est l'opposé de celle qui résulte du système de l'émission, parce que dans le système de l'émission on suppose que la vitesse de la lumière augmente quand elle pénètre dans un milieu réfringent, et c'est le contraire dans celui des vibrations.

733. La loi de la réfraction que nous venons de tronver s'accorde très-bien avec une belle expérience de M. Arago, que nous allons rapporter. Lorsqu'on fait interférer deux faisceaux lumineux, provenant de deux fentes fines et très-rapprochées, ou provenant de la réflexion sur deux miroirs peu inclinés, les franges sont symétriquement placées par rapport au plan mené par le point lnmineux et le milieu de l'intervalle des fentes, ou la ligne de jonction des miroirs, quand les deux faisceaux ont traversé le même milieu; mais lorsqu'un des faisceaux n'ayant traversé que de l'air, l'autre rencontre sur son passage un corps plus réfringent, tel qu'une lame de mica, une feuille mince de verre, les franges sont déplacées et portées du côté du faisceau qui a traversé la lame transparente. Or, le milien de la bande centrale est toujours produit par l'arrivée simultanée des rayons partis en même temps, parce que les vitesses étant égales, les ondes ont éprouvé le même nombre d'intermittences; on conçoit alors que si les deux faisceaux traversent des milieux dans lesqnels la vitesse ne soit pas la même, la bande centrale devra se rapprocher du faisceau qui a marché le plus lentement, afin que le retard qu'il a éprouvé étant compensé par un plus court chemin parcouru, tous deux arrivent encore en même temps. Or, en mesurant cette différence de chemin, et connaissant l'épaisseur de la lame transparente, on peut en déduire le rapport de la vitesse avec laquelle la lumière se meut dans l'air et dans la lame. M. Arago a trouvé ainsi qu'elles étaient proportionnelles au sinus d'incidence et de réfraction. Cette méthode peut par conséquent être employée avec avantage pour déterminer les indices de réfraction; mais il faut



que les lames réfringentes soient très-minces ou que les milieux parcourus diffèrent peu du pouvoir réfringent; car autrement les franges sortent du champ commun des deux faisceaux.

734. *Dispersion.* Nous avons déjà dit que la longueur d'oscillation n'était pas la même pour les différens rayons colorés. Pour expliquer leur séparation par la réfraction, il faut nécessairement admettre pour chacun d'eux un pouvoir réfringent différent, c'est-à-dire, que les ondes de différentes longueurs ne se propagent pas avec la même vitesse. Cependant, d'après la théorie de M. Poisson sur la propagation des ondes sonores dans les fluides élastiques, la vitesse de propagation est indépendante de la longueur de l'onde; mais ce résultat repose sur l'hypothèse que chaque tranche infiniment mince n'est influencée que par la tranche en contact, et par conséquent que la force accélératrice ne s'étend qu'à des distances infiniment petites relativement à la longueur d'une ondulation; mais cette hypothèse pourrait bien ne pas être exacte pour les ondes lumineuses, qui sont incomparablement plus petites que les ondes sonores; il est probable au contraire que les forces accélératrices s'étendent sur une portion sensible des ondes, de sorte que celles qui sont les plus longues sont moins ralenties que les autres.

735. *Double Réfraction et Polarisation.* Ces deux classes de phénomènes ont les rapports les plus intimes, puisque les rayons réfractés à travers une substance cristallisée, sont polarisés dans deux plans rectangulaires. D'après M. Fresnel, la polarisation consiste dans la décomposition des petits mouvemens qui ont lieu dans les ondes, en deux autres mouvemens perpendiculaires entre eux et à la direction du plan de polarisation. Cette hypothèse explique très-bien une belle découverte de M. Fresnel, et qui consiste en ce que des faisceaux polarisés dans des plans rectangulaires ne produisent point de franges par leur interférence; elle explique aussi très-bien la loi que Malus a observée relativement aux intensités des deux rayons réfractés ordinairement et extraordinairement à travers un rhomboïde de spath d'Islande.

736. La coloration de la lumière déjà polarisée, à sa sortie d'un cristal jouissant de la double réfraction, est due, suivant M. Young, à l'interférence des faisceaux réfractés ordinairement et extraordinairement. M. Fresnel, en approfondissant davantage ce phénomène, a découvert pourquoi la lumière devait être primitivement polarisée, et comment l'intensité des teintes variait avec les directions relatives du plan primitif et de la section principale de la lame cristallisée. Il a démontré en même temps que les lames cristallisées, quelle que soit leur épaisseur, polarisent la lumière de la même manière que les lames épaisses, et que l'hypothèse ingénieuse de la polarisation mobile, imaginée par M. Biot pour expliquer les phénomènes de la polarisation colorée, était sans fondement. Nous regrettons que les limites de cet ouvrage, que nous avons déjà dépassées, ne nous permettent pas de donner les déve-

loppemens nécessaires à cette belle théorie; nous renvoyons pour cela aux mémoires publiés par M. Fresnel.

737. *Couleurs propres des corps.* Les phénomènes de la coloration des corps, dans le système des ondulations, s'expliquent en admettant de la part des corps une action pour éteindre certaines vibrations; mais on n'est pas plus avancé que dans le système de l'émission, pour concevoir comment les corps agissent pour produire ces effets, et comment la longueur des ondulations peut avoir de l'influence pour modifier l'action du corps. Il y a cependant quelques faits particuliers qui s'expliquent très-facilement dans ce système; c'est la couleur irisée de certains corps, tels que le nacre de perle, les élitres de certains insectes. La surface de ces corps est formée d'un grand nombre de petites rainures de peu de profondeur; la lumière incidente réfléchie à d'inégales profondeurs donne des rayons dont les ondes sont en retard les unes sur les autres et qui interfèrent comme les rayons réfléchis aux deux surfaces des lames minces: il en résulte alors une coloration qui dépend à la fois de l'inclination de la profondeur des stries et de l'inclinaison de l'œil sur la surface. On reconnaît facilement que c'est à ces stries que les corps doivent leurs couleurs, car si on prend l'empreinte de ces corps sur de la cire molle, elle présente les mêmes phénomènes de coloration.

738. En résumant les deux derniers paragraphes, on voit que dans le système de l'émission, à chaque nouveau phénomène on admet une hypothèse nouvelle, qui n'est souvent que l'expression des lois observées, et qui ne satisfait aux phénomènes que comme une formule empyrique aux faits qui ont servi à la déterminer, et que les phénomènes de la diffraction sont non-seulement inexplicables dans ce système, mais en opposition manifeste avec l'hypothèse principale qui repose sur une action des corps et de la lumière, ne se manifestant qu'à une très-petite distance; en effet, les bandes diffractées ayant une courbure très-sensible sur une étendue de plusieurs mètres, et cette inflexion de la lumière étant indépendante de la nature des corps que rase la lumière, on ne peut pas admettre que ces phénomènes soient dus à une action de ce corps, car elle varierait avec sa nature et ne pourrait pas s'étendre à une distance aussi considérable. Mais le fait le plus remarquable, est la formation des bandes obscures par l'action de deux faisceaux; car il en résulte que de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité; or, dans le système où la lumière est due à des particules lumineuses, deux faisceaux réunis doivent toujours augmenter l'intensité de la lumière.

739. Au contraire, toutes les explications dans le système des vibrations sont dérivées d'une seule et même hypothèse, dont le principe d'Huyghens et celui des interférences sont des conséquences nécessaires. Tous les phénomènes se lient et auraient pu être prévus d'avance, et aucun des phénomènes expliqués dans le système de

l'émission, n'échappe à celui des interférences; ainsi, dans l'état actuel de la science, ce dernier a sur le premier un immense avantage, et la probabilité est toute en sa faveur.

§ IV.

De la Vision.

740. *Structure de l'Œil.* L'organe de la vision dans l'homme est formé d'un globe ovoïde, placé dans une cavité osseuse. Les paupières sont destinées à le recouvrir d'une couche liquide qui se renouvelle à mesure que l'évaporation la fait disparaître; les cils qui bordent les paupières s'opposent à l'introduction des petites poussières qui blesseraient l'œil ou terniraient sa surface; les sourcils qui couronnent l'orbite sont destinés à détourner la sueur qui s'écoule souvent du front. Le globe de l'œil est formé d'une enveloppe extérieure, blanche et opaque dans la partie postérieure, et transparente dans la partie antérieure; la partie opaque AEDFB (*fig.* 63) porte le nom de *sclérotique* ou de *cornée opaque*; l'autre partie A B porte le nom de *cornée transparente*. La cornée opaque est recouverte intérieurement d'une membrane désignée sous le nom de *choroïde*, enduite d'une liqueur noire d'une teinte très-foncée; enfin, la partie médullaire du nerf optique s'épanouit au fond de l'œil sur la choroïde, en une membrane mince, d'un gris blanchâtre, qu'on nomme *rétine*. Derrière la cornée transparente se trouve une bande circulaire opaque, de couleur variable, désignée sous le nom d'*iris*; elle est percée d'une ouverture circulaire qui porte le nom de *pupille*; l'ouverture de la pupille peut se contracter et se dilater. Derrière la pupille est placé un corps lenticulaire CC, d'une matière solide et transparente, désigné sous le nom de *cristallin*; il paraît immobile. Enfin, l'espace compris entre la cornée transparente et le cristallin est rempli d'une liqueur désignée sous le nom d'*humeur aqueuse*, et l'espace compris entre le cristallin et le fond de l'œil est occupé par une matière gélatineuse qui porte le nom d'*humeur vitrée*; ces deux humeurs sont d'une transparence parfaite.

741. *Marche des rayons dans l'œil.* Les rayons qui viennent frapper la cornée transparente, la traversent en se rapprochant; les rayons d'une trop grande obliquité sont rejetés par l'iris, ceux qui sont admis par la pupille se rapprochent encore en traversant le cristallin, et vont former sur la rétine une image renversée des objets extérieurs. Ces images peuvent facilement se reconnaître en prenant un œil de bœuf extrait peu temps après sa mort, amincissant postérieurement la sclérotique et la plaçant entre l'œil et un objet éclairé: on aperçoit par transparence l'image renversée du corps éclairé. On peut faire cette expérience d'une manière plus simple sur les yeux

des animaux albinos; car la liqueur noire de la choroïde n'existant pas, et la sclérotique étant transparente, on aperçoit immédiatement l'image.

Les images que l'on obtient au moyen des lentilles ordinaires ont deux imperfections qui n'existent point dans les images qui se forment sur la rétine; l'une vient de ce que les bords des lentilles ne concentrent pas les rayons rigoureusement au même foyer que ceux qui sont voisins du centre: on la désigne sous le nom d'*Aberration de sphéricité*; l'autre provient de ce que les rayons de différentes couleurs ayant des réfrangibilités différentes, forment des foyers distincts: on la désigne sous le nom d'*Aberration de réfrangibilité.* De la première il résulte que les images doivent être diffuses; et de la seconde, qu'elles doivent être terminées par des franges irisées, à cause des différences de position des images de différentes couleurs. Il faut donc admettre que les parties de l'œil sont disposées de manière à faire disparaître ces aberrations. Il paraît que l'aberration de sphéricité est en grande partie compensée, 1° par l'iris qui intercepte les rayons trop obliques : 2° par la forme de la surface postérieure du cristallin qui est plus plate au centre que vers les bords, ce qui fait que les rayons obliques la rencontrent sous de plus petites incidences; 3° par la concavité de la rétine qui la rapproche des rayons obliques. Quant à l'aberration de réfrangibilité, elle paraît détruite par la composition du cristallin qui est formé de couches concentriques d'inégales densités.

742. *Distance de vision distincte.* La vision distincte a dans l'homme une étendue considérable. Aussi on voit nettement des objets à quelques pouces et à plusieurs pieds; cette variation de la vue distincte ne semble pouvoir s'expliquer que par des changemens de courbures des milieux diaphanes, ou par la variation de leurs distances; cependant l'anatomie la plus scrupuleuse de l'œil et l'observation la plus exacte ne permettent d'admettre aucun de ces changemens; ainsi ce fait est jusqu'ici sans explication satisfaisante. Cependant nous en rapporterons une, proposée par Lahire, qui offre assez de probabilité. Suivant ce physicien, l'iris se contractant et ne laissant entrer que des rayons peu inclinés, l'image formée sur la rétine peut être encore très-nette, quoique n'étant pas au foyer. Une expérience facile à répéter vient à l'appui de cette théorie: si on regarde un corps placé très-près de l'œil, on le voit confusément; mais son image devient distincte si on le regarde à travers une carte percée d'une très-petite ouverture.

743. *Sensation de la lumière.* Tout ce que nous savons sur la vision, consiste en ce qu'il se forme sur la rétine une image renversée des objets extérieurs; mais il paraît que cette image n'est que la cause de la sensation : la modification quelconque qu'éprouve la rétine, se transmet au cerveau par le nerf optique, et c'est là qu'a réellement lieu la sensation; cependant ce qu'il y a de remarquable, c'est que nous rapportons toujours les objets sur la direction des rayons qui arrivent sur la cornée transparente et non sur ceux qui frappent la rétine, quoique ces deux systèmes de rayons aient des directions différentes; mais cela tient probablement à ce que l'ex-



périence nous a appris à trouver les corps sur cette direction. Lorsque l'œil est dirigé vers un point lumineux, l'image est rapportée au sommet du cône lumineux incident, et l'appréciation de la distance dépend de l'angle de ces rayons; mais cette appréciation n'a de justesse qu'autant que l'angle du sommet du cône est sensible, c'est-à-dire, qu'autant que le point lumineux est voisin de l'œil. Lorsque les deux yeux sont en même temps fixés sur le point lumineux, l'estimation de la distance dépend principalement de l'angle formé par les deux faisceaux reçus par les deux pupilles : on conçoit qu'alors le jugement porté sur la distance des objets a beaucoup plus de justesse, et s'étend dans de bien plus grandes limites; car il dépend d'un angle dont la base est la distance des deux yeux. On explique facilement d'après cela pourquoi il faut regarder avec les deux yeux pour apprécier la distance. Quant au jugement que nous portons sur la grandeur absolue des corps, il résulte et de leur diamètre apparent, ou de l'angle formé par les rayons qui partent de leurs extrémités, et de l'idée de leurs distances.

744. Les deux images qui se forment dans les deux yeux ne donnent qu'une seule sensation, parce que les nerfs optiques se réunissent en pénétrant dans le cerveau; mais il faut cependant que les images soient placées sur des points correspondans des deux rétines, autrement elles deviennent distinctes toutes deux; c'est ce que l'on peut facilement vérifier en pressant un œil avec le doigt pour le déranger de sa position.

745. La sensation a une certaine durée; car si l'on fait tourner rapidement un morceau de bois dont une extrémité soit incandescente, on aperçoit une ligne lumineuse continue. La sensation paraît s'émousser par l'usage; car si l'on fixe long-temps une certaine couleur, en regardant ensuite un corps blanc, on y aperçoit une tache dont la teinte est complémentaire de celle sur laquelle l'œil s'est fixé d'abord, c'est-à-dire, qui se compose des rayons dont cette première teinte ne fait pas partie; ces apparences portent le nom de *couleurs accidentelles*.

746. Les bandes irisées et les faisceaux divergens que l'on aperçoit quelquefois en regardant un objet lumineux, proviennent des petites gouttes liquides qui se trouvent accidentellement dans les cils, et de la diffraction que la lumière éprouve à leur surface.

747. Un point lumineux étant rapporté par la vue sur l'axe des faisceaux lumineux qu'il envoie à l'œil, il en résulte que les contours des objets sont sur la surface d'un cône qui a pour centre la prunelle et qui est tangent aux bords du corps, et l'image formée sur la rétine est semblable à une section du cône perpendiculaire à son axe. Ainsi toutes les sections de ce cône par des surfaces planes ou courbes formeront sur la rétine des images terminées par les mêmes contours. La section de ce cône par un plan porte le nom de *perspective*. Il en résulte que pour avoir la perspective d'un objet quelconque, il faut par tous les points de ce corps et par l'œil mener des lignes droites, et déterminer l'intersection de ce système de lignes par un plan qui occupe la position du tableau sur lequel la perspective doit être rapportée.

748. La distance de la vue distincte n'est pas la même chez tous les individus. Par l'âge, la partie antérieure de l'œil s'aplatit, et par conséquent la convergence des rayons lumineux diminue; il faut alors, pour que les rayons forment leur foyer sur la rétine, que la divergence des rayons qui arrivent à l'œil soit très-petite, et par conséquent que les objets soient éloignés. Cet état de l'œil a reçu le nom de *presbytisme* ; on y remédie en fixant devant l'œil une lentille convergente, car la divergence des rayons étant diminuée par l'interposition de cet appareil, tout se passe comme si les rayons partaient de plus loin. On rencontre souvent et dans tous les âges le défaut opposé, qu'on désigne sous le nom de *myopisme*; la cornée transparente étant trop convexe, les rayons deviennent trop convergens, les foyers des objets éloignés se forment en avant de la rétine, et la vision est confuse: on obvie à cet inconvénient en plaçant devant l'œil une lentille divergente; la divergence des rayons incidens se trouve alors augmentée, et tout se passe comme si l'objet était plus rapproché. Pendant long-temps on a uniquement employé des verres bi-convexes ou bi-concaves; mais M. Wolaston a proposé l'usage des verres concaves convexes (2mes lentilles des fig. 25 et 26), afin de distinguer plus nettement les objets placés très-obliquement; ces verres pour cet usage portent le nom de *périscopiques*.

§ V.

Météores lumineux.

749. Les phénomènes lumineux qui se développent dans l'atmosphère sont nombreux, nous les examinerons successivement.

750. *Crépuscule.* On désigne ainsi la lumière qui précède le lever du soleil et qui suit son coucher; elle provient de la réflexion des parties supérieures de l'atmosphère.

751. *Déviation des rayons qui traversent l'atmosphère.* L'atmosphère ayant une densité décroissante, à partir de sa surface, tous les rayons incidens qui ne pénètrent pas perpendiculairement à la surface des couches d'égale densité sont déviés et se rapprochent de la verticale, et cela d'autant plus qu'ils se rapprochent davantage de la surface de la terre (*fig.* 64); or comme nous jugeons toujours que les corps sont placés dans la direction des rayons qui arrivent à l'œil, il s'ensuit que nous voyons les corps plus élevés qu'ils ne le sont réellement, et cela d'autant plus qu'ils sont plus près de l'horizon. Ainsi nous apercevons déjà le soleil qu'il n'a pas encore réellement dépassé l'horizon.

752. *Mirage.* Nous avons vu que quand un rayon lumineux sortait d'un milieu pour entrer dans un autre d'une moindre densité, la réfraction se changeait en réflexion, lorsque les rayons étaient suffisamment inclinés sur la surface de séparation. On conçoit d'après cela que si le milieu AB, CD (*fig.* 65) allait en décroissant de

densité de AB en CD, des rayons partis du point M et suffisamment inclinés se réfléchiraient dans l'intérieur du fluide comme sur un miroir, et un observateur placé en N verrait deux images du point M, l'une droite provenant des rayons directs, l'autre renversée provenant des rayons réfléchis. Ces circonstances se rencontrent dans les grandes plaines sablonneuses fortement échauffées par les rayons solaires; les couches d'air immédiatement en contact avec le sol se trouvant à une température plus élevée que les couches supérieures, on y aperçoit distinctement les images droites et renversées des objets placés à l'horizon. Le mirage a été souvent observé par l'armée française pendant l'expédition d'Égypte: le sol de la Basse-Égypte est une vaste plaine dont l'uniformité n'est interrompue que par quelques éminences où sont placés les villages; lorsque la surface du sol est échauffée par la présence du soleil, le terrain semble terminé par une inondation générale; chaque monticule présente au-dessous son image renversée comme s'il était entouré d'eau. Le mirage a lieu aussi quelquefois en mer, mais il est moins fréquent et plus faible que sur terre. Ces phénomènes ont encore été observés par MM. Biot et Mathieu aux environs de Dunkerque et par MM. Jurine et Soret sur le lac de Genève. On peut les produire artificiellement, en exposant à l'ardeur du soleil une longue barre de fer noircie, ou en faisant chauffer inférieurement une plaque de tôle horizontale, et regardant par une de ses extrémités des objets peu élevés au-dessus de l'autre.

753. *Arc-en-ciel.* L'arc-en-ciel est, comme on sait, une couronne présentant toutes les couleurs du spectre solaire, et qui apparaît quand les rayons du soleil viennent frapper un nuage qui se réduit en eau, et que l'observateur tourne le dos au soleil; on aperçoit ordinairement deux arcs concentriques; dans l'arc extérieur, les couleurs, en commençant par la partie la plus élevée, se succèdent dans l'ordre suivant: violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge; dans l'arc intérieur, les couleurs suivent l'ordre contraire. Le centre de l'arc-en-ciel est toujours placé sur la ligne qui joint le centre du soleil avec l'œil. Le phénomène de l'arc-en-ciel s'observe aussi dans cette espèce de pluie artificielle que produisent les jets d'eau.

Il résulte des circonstances que nous venons de décrire, que ce phénomène est dû à l'influence des gouttes d'eau sur les rayons solaires. Pour examiner en quoi elle consiste, considérons d'abord un rayon de lumière homogène SI (*fig.* 66), et examinons sa marche dans une goutte liquide sphérique. Au point I, une partie du rayon sera réfléchie, et une autre réfractée suivant II'; au point I', le rayon se divisera encore en deux autres, dont l'un sera réfléchi et l'autre réfracté, et ainsi de suite. Considérons maintenant deux rayons incidens homogènes voisins (*fig.* 67); chacun d'eux éprouvera la même série de réflexions et de réfractions; mais comme leurs premières incidences sur la goutte d'eau sont différentes, ils ne resteront pas parallèles, et les rayons qui sortiront après un même nombre de réflexions intérieures

ne seront point parallèles. Cependant leur écart ne sera point constant, et il est facile de prévoir que les rayons émergens seront sensiblement parallèles, lorsque l'incidence sera telle que la déviation du rayon réfracté sur le rayon incident soit à son maximum; en effet, c'est une propriété générale des quantités qui passent par un maximum ou un minimum, de n'éprouver que de faibles variations dans le voisinage de ces états; par conséquent, les rayons incidens qui seront très-voisins de celui qui correspond au maximum de déviation, seront sensiblement parallèles; donc si on conçoit un faisceau de rayons parallèles qui viennent frapper la moitié de la surface d'une sphère liquide, tous les rayons réfractés, après un même nombre de réflexions, formeront un faisceau dont les rayons se disperseront dans tous les sens, excepté ceux qui correspondent au maximum de déviation, qui seront sensiblement parallèles. Il résulte de là, que ces derniers seuls seront appréciables à l'œil, parce que cet organe ne peut pas être affecté par des rayons isolés; c'est pour cette raison que Newton les a nommés *rayons efficaces*. Dans ce qui précède, nous avons supposé les rayons homogènes; mais s'ils étaient formés de lumière blanche, il est évident que la lumière se comporterait comme dans un prisme, dont les faces seraient tangentes à la sphère aux points d'incidence et d'émergence; par conséquent, les rayons se sépareraient à leur sortie, et chaque rayon coloré donnerait un rayon efficace distinct; car la direction de ce rayon dépend du pouvoir réfringent, et nous savons qu'il varie avec la couleur. On trouve par le calcul que les rayons efficaces de lumière rouge dont l'indice de réfraction est $\frac{108}{81}$, correspondans à une seule réflexion intérieure dans une sphère d'eau, ont une incidence de 59°, 30', et une déviation de 42°,1'; que pour deux réflexions intérieures, l'incidence est de 71°, 49' 55", et la déviation de 50°, 58' 50"; que pour les violets extrêmes, dont l'indice de réfraction est de $\frac{109}{81}$, pour une réflexion intérieure, l'incidence est de 58°,40',0", la déviation de 40°,17'; et pour deux réflexions, l'incidence est de 71°, et la déviation de 54°,9'. Les incidences et les déviations des rayons intermédiaires seront évidemment compris entre ces limites.

Supposons maintenant dans l'air un grand nombre de globules d'eau se succédant rapidement dans leur chute; tout se passera comme si chacun d'eux était immobile; considérons seulement d'abord les rayons envoyés par le centre du soleil, que nous pouvons, sans erreur appréciable, considérer comme parallèles; soit O la position de l'œil; si nous menons la ligne OC parallèle aux rayons solaires, et la droite OV faisant avec OC un angle de 40°,17', il est évident que les gouttes d'eau qui se trouveront dans cette direction enverront à l'œil des rayons efficaces violets, après une seule réflexion intérieure. En menant de même les lignes OR, OV' OR' de manière que ROC = 42°,2', R'OC = 50°,59', et V'OC = 54°,9', l'œil recevra suivant OR des rayons efficaces rouges après une seule réflexion intérieure, et suivant OR' et OV', des rayons rouges et violets après deux réflexions intérieures, et dans les

directions comprises entre VO et RO, V'O' et R'O', les rayons efficaces des couleurs intermédiaires ; ainsi, s'il n'y avait qu'une série verticale de globules d'eau, l'œil apercevrait deux spectres très-minces, dont les teintes se succéderaient en sens contraire et dont le plus élevé aurait une intensité moindre que celui qui est inférieur, à cause de la double réflexion intérieure qu'ont éprouvé les rayons qui le forment; mais si la masse de globules a une étendue suffisante, ces spectres auront lieu dans tous les plans passant par OC et se trouveront à la même distance du point C; par conséquent, l'œil apercevra deux systèmes de bandes circulaires colorées, ayant pour centre le point C, dont les rayons violets formeront les cercles extérieurs et intérieurs. Le diamètre apparent de la bande colorée intérieure sera égal à 42°,2' — 40°,17' ou 1°,45' ; celui de la bande extérieure de 54°,9' — 50,58 ou de 3°,11', et la distance des deux bandes sera 50°,59' — 42°,2' ou 8°,57'.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que le soleil n'était qu'un point ; mais il n'en est pas ainsi, son diamètre apparent est d'environ 30'; par conséquent chaque point du soleil formera un arc-en-ciel ayant les dimensions déterminées plus haut, et c'est la superposition de tous ces arcs partiels qui ne coïncident pas, qui formera l'arc observé. Pour déterminer les dimensions de cet arc total, observons que les arcs qui seraient produits par les points de la circonférence du soleil auraient leur centre sur la ligne menée par l'œil et par chacun de ces points; par conséquent, tous les arcs formés par la surface du soleil auront leur centre dans le cercle qu'on décrirait autour du point C, et dont le diamètre apparent serait égal à celui du soleil. Ainsi la bande violette résultant d'une seule réflexion intérieure sera formée de tous les cercles ayant leurs centres dans la surface du cercle C' C" et qui auront pour demi-diamètre apparent 40°,17'; or il est évident (*fig.* 69) que cette bande aura pour épaisseur 30' ainsi que toutes les autres; il résulte de là que le cercle extérieur sera plus grand de 15' que celui qui correspond au centre du soleil, et que le cercle intérieur sera plus petit de la même quantité. On aura donc, pour les différens élémens, les valeurs suivantes : ROC = 42°,2' + 15' = 42°,17', ROV = 40°,17' — 15' = 40°,2', R'OC = 50°,59' — 15' = 50°,44', V'OC = 54°,9' + 15' = 54°,24'. Il est facile de déduire de là que l'épaisseur de l'iris intérieure sera de 2°,15', celle de l'iris extérieure de 3°,40', et la distance des iris de 8°,27'. On prévoit aisément qu'à cause de la largeur de chaque bande colorée et de leur superposition dans chaque iris, leurs couleurs seront beaucoup moins vives que dans la supposition où le corps éclairant serait réduit à un point.

Toutes les circonstances que nous venons de décrire sont d'accord avec l'observation, et Newton, en mesurant le diamètre apparent des différens cercles colorés d'un arc-en-ciel, a trouvé exactement les nombres indiqués par la théorie.

C'est à Descartes qu'on doit l'explication de l'arc-en-ciel; c'est lui qui le premier détermina par le calcul la marche des rayons à travers une goutte d'eau, reconnut

et détermina la position des rayons efficaces; mais comme alors il ignorait l'inégale réfrangibilité des rayons différemment colorés, il ramena le phénomène de la coloration à ceux qui se produisent dans le prisme; enfin, il vérifia sa théorie par des expériences directes, en faisant arriver des rayons lumineux dans une chambre obscure sur une sphère de verre pleine d'eau.

754. On observe encore quelquefois dans le ciel d'autres météores lumineux d'une forme régulière, tels sont les *couronnes*, les *parélies* et les *aurores boréales*. Les couronnes qui paraissent autour du soleil ou de la lune sont ordinairement blanchâtres, mais quelquefois elles sont plus vives et présentent les couleurs de l'iris; l'espace qu'elles embrassent est ordinairement plus sombre que la partie du ciel qui les environne. Les parélies consistent dans l'apparition de plusieurs images du soleil, situées sur un cercle blanc parallèle à l'horizon et placé à la hauteur du soleil; les images qui sont situées du même côté que le soleil présentent les couleurs de l'arc-en-ciel, les images opposées sont toujours incolores; le parélie le plus complet a été observé à Dantzick le 20 février 1661; Huyghens en a donné une explication complète, en admettant dans l'air un grand nombre de petits cylindres formés d'un noyau opaque et d'une partie extérieure transparente. L'aurore boréale apparaît à l'horizon du côté du nord, en tirant un peu vers l'ouest, trois ou quatre heures après le coucher du soleil: elle s'annonce d'abord par une espèce de brouillard sous la forme d'un segment de cercle dont le corde s'appuie sur l'horizon; les contours du segment paraissent bientôt bordés d'arcs concentriques lumineux, séparés par des bandes obscures; la partie obscure du segment lance des jets de lumière qui se renouvellent avec une extrême rapidité; au zénith on aperçoit une couronne enflammée; le phénomène a alors acquis toute sa magnificence, il diminue ensuite graduellement, les jets de lumière deviennent plus rares, la lumière se concentre vers le nord et enfin disparaît. Ce singulier phénomène paraît être lié au magnétisme terrestre, car on a observé 1° que le centre des arcs concentriques était sur le méridien magnétique; 2° que le point où les rayons lumineux partis de l'horizon se réunissent est précisément celui vers lequel se dirige l'aiguille de déclinaison. Plusieurs physiciens ont essayé de donner une explication des aurores boréales, mais aucune n'est satisfaisante.

§ VI.

Appareils et Instrumens d'Optique.

Instrumens de Réflexion.

755. *Miroirs plans.* Nous avons dit que quand un point lumineux envoie des rayons sur un miroir plan, tous les rayons réfléchis prolongés passent par un

point situé derrière le miroir sur la perpendiculaire abaissée du point lumineux, et à une distance du miroir égale à celle du point lumineux. Or, comme l'œil rapporte les objets aux points de concours des derniers rayons qu'il en reçoit, l'image du point lumineux O (*fig.* 70) sera vue en O'. Il est facile de déduire de là que l'objet et son image sont toujours symétriquement placés par rapport au miroir (*fig.* 71).

756. Si deux miroirs A B et C D (*fig.* 72) sont parallèles, les rayons émanés du point lumineux *a* pourront arriver à l'œil placé en O après une ou plusieurs réflexions, et par conséquent il apercevra dans chacun d'eux une série d'images dont les teintes iront en s'affaiblissant à mesure que les rayons qui les forment auront subi un plus grand nombre de réflexions : pour construire ces images, il suffit de remarquer que tous les rayons qui ont subi une réflexion vont concourir à la première image ; par conséquent, tout se passe comme si cette image était lumineuse ; ainsi on trouvera l'image qui résulte de deux réflexions, en cherchant l'image de *a'* dans le miroir C D, et l'image de *b* dans le miroir A B ; de même en traçant les images des points *a''* et *b'* dans les miroirs A B et C D, on obtiendra celles qui proviennent de trois réflexions, et ainsi de suite. On voit d'après cela que les deux séries d'images sont situées sur une même ligne droite perpendiculaire aux deux miroirs.

757. Les miroirs en glace étamée présentent une série d'images lorsqu'on regarde les objets sous des angles très-petits. Pour concevoir ce phénomène, il faut observer qu'une partie de la lumière est réfléchie à la première surface de la glace, et donne une première image ; une autre partie de la lumière pénètre et se réfléchit contre la surface métallique, mais lorsque cette lumière se présente pour sortir, une portion est réfléchie intérieurement, retourne à la seconde surface, et ainsi de suite ; par conséquent, il y a deux images qui proviennent d'une seule réflexion, l'une à la surface supérieure, l'autre à la surface inférieure, et une suite d'autres qui proviennent de 3, 5, 7, etc. réflexions ; c'est la deuxième image qui est la plus brillante ; elles sont toutes très-rapprochées quand la réflexion a lieu sous un angle un peu considérable, à cause de la petite épaisseur de la glace ; pour les distinguer, il faut les observer sous un très-petit angle, afin de les écarter et de les rendre plus brillantes.

758. Si les deux miroirs sont inclinés (*fig.* 73), il est évident que les images successives des bords des miroirs feront entre elles des angles égaux à celui des deux miroirs ; si l'angle A O B est une fraction exacte de la circonférence, ayant 1 pour numérateur, les images, après avoir fait une révolution autour du point O, se superposeront sur les premières, et l'espace autour du point O paraîtra divisé en secteurs réguliers ; par la même raison un objet placé devant les miroirs donnerait deux images dans chaque secteur, et l'ensemble de toutes ces images pré-

sentera une parfaite symétrie; mais pour cela il faut que l'angle des miroirs soit une fraction bien exacte de la circonférence.

759. *Goniomètres.* On désigne ainsi les instrumens destinés à mesurer les angles des corps solides; il en est qui sont formés de deux règles mobiles qu'on applique sur les faces dont on veut mesurer l'inclinaison, et que l'on porte ensuite au centre d'un cercle divisé qui en mesure l'écartement; mais on leur substitue avec avantage les appareils suivans.

Le goniomètre de Charles consiste (*fig.* 74) en un cercle de cuivre divisé AB, dont le centre reçoit une alidade mobile, et une lunette horizontale fixe CD renfermant à son foyer un fil vertical. Pour mesurer les angles d'un cristal, on le fixe sur l'alidade au moyen de la cire; on dirige la lunette sur le cristal et en regardant par réflexion sur chacune des deux faces du cristal l'image d'une ligne verticale, on s'assure que la ligne d'intersection des deux faces a cette direction; alors on dispose l'alidade de manière que l'image soit placée derrière le fil, et on la fait tourner jusqu'à ce que l'image formée sur l'autre face coïncide également avec le fil; l'angle décrit par l'alidade est alors le supplément de l'angle des deux faces du cristal. En effet, soit BAC (*fig.* 75) la projection de l'angle dièdre, *ab* et *bc* le rayon incident et le rayon réfléchi sur la surface BA; pour que la surface AC réfléchisse les rayons parallèles à *ab*, dans la même direction *bc*, il faut nécessairement que AC vienne se placer parallèlement à AB : l'angle décrit est donc égal à CAC' qui est supplément de BAC.

Le goniomètre de M. Wolaston (*fig* 76) est composé d'un cercle vertical de cuivre, gradué sur son bord, et mobile autour d'un axe AA, qui est supporté par un pied CP; l'axe AA est percé dans toute sa longueur pour laisser passer un axe intérieur *aa*, dont une des extrémités porte plusieurs pièces à mouvemens rectangulaires, sur lesquelles on fixe avec une petite pince le cristal dont on veut mesurer les angles. Pour employer cet instrument, on commence par placer le limbe verticalement et le cristal de manière que l'arète commune des deux faces dont on veut mesurer l'inclinaison soit horizontale; pour remplir cette dernière condition, on place l'œil très-près du cristal, on regarde des lignes horizontales d'un édifice, et on tourne le cristal jusqu'à ce que les lignes supérieures, vues par réflexion, coïncident avec les lignes inférieures vues directement; les deux faces remplissant cette condition, leur intersection est horizontale; pour mesurer l'angle des deux faces, il ne faut plus que répéter cette observation successivement sur l'une et sur l'autre, en faisant mouvoir le cristal avec le limbe au moyen de l'axe AA; l'angle décrit est le supplément de l'angle cherché : l'instrument est gradué de manière à donner cet angle lui-même quand on met d'abord l'index sur le zéro. Pour que les mesures que l'on obtient ainsi soient exactes, il faut que la distance de l'œil au cristal, et le cristal

lui-même, soient infiniment petits relativement à la distance des lignes qui servent de mires; cette condition est toujours facile à remplir.

760. *Miroirs courbes.* Nous avons déjà parlé des images qui se forment dans l'espace par la réflexion des miroirs courbes; nous avons vu qu'elles sont le lieu des foyers de tous les points de l'objet lumineux; elles ne sont visibles que quand on les reçoit sur un corps opaque, ou que l'œil est placé dans une position particulière. Les images que l'on voit dans tous les miroirs courbes, concaves ou convexes, sont aux points de concours des différens faisceaux de rayons qui sont reçus par l'œil; si tous les rayons partis d'un même point de l'objet se réunissaient rigoureusement en un même point, l'image que l'on aperçoit serait exactement le lieu des foyers des points éclairans, et par conséquent elle coïnciderait avec l'image qui se forme dans l'espace. Mais nous avons vu qu'il n'en est pas ainsi, et que les rayons réfléchis par une surface quelconque se coupaient sur deux surfaces particulières que nous avons désignées sous le nom de Caustiques; par conséquent, c'est sur ces surfaces que seront les images du point lumineux. De là il est facile de conclure que si par le centre de la prunelle on mène une droite tangente aux deux surfaces caustiques, on aura le rayon qui forme l'axe du faisceau réfléchi qui revient à l'œil; les autres rayons en seront très-rapprochés, et se couperont sensiblement aux points de tangence du premier avec les deux surfaces; si ces deux points sont de côtés différens par rapport à l'œil, l'image du point lumineux sera vue dans celui de ces points qui est en avant de l'œil; mais si les deux points de tangence sont en avant de l'œil, la distance apparente devra être une combinaison des distances de ces deux points à l'œil. Nous admettrons avec Newton que le lieu de l'image partage en deux parties égales l'intervalle compris entre les deux points où l'axe commun des deux faisceaux touche les deux surfaces.

Appliquons ces considérations générales aux miroirs sphériques. Les deux caustiques sont, 1° l'axe optique, c'est-à-dire le diamètre du miroir qui passe par le point lumineux; 2° une surface de révolution autour de cet axe dont nous avons indiqué la construction. L'image d'un point quelconque s'obtiendra donc en menant par l'œil et l'axe optique un plan, et dans ce plan une tangente à la caustique qui passe par l'œil. Les figures 77, 78, 79, 80 représentent les images vues dans des miroirs convexes et concaves; à leur inspection, on reconnaît facilement 1° que les images données par les miroirs convexes sont toujours plus petites que l'objet, et sont situées derrière le miroir (*fig.* 77); car les foyers sont toujours imaginaires; 2° que celles que produisent les miroirs concaves sont d'autant plus grandes que l'objet est plus près du centre (*fig.* 78), parce que les axes optiques des points extrêmes s'écartent d'autant plus que l'objet se rapproche davantage du centre; 3° que quand il est placé entre le miroir et le foyer principal les sommets des caustiques sont placés derrière le miroir (*fig.* 80), par conséquent ils

sont disposés de la même manière que l'objet : l'image est droite et située derrière le miroir ; 4° que si l'objet est placé entre le foyer principal et le centre (*fig.* 78), les sommets des caustiques sont toujours au delà du centre, et, par conséquent, l'image est en sens contraire de l'objet, car les points les plus élevés ont leur caustique le plus bas et réciproquement ; ainsi l'image sera renversée et située en avant du centre ; 5° si l'objet est au delà du centre, les sommets des caustiques sont situés entre le foyer principal et le miroir, et par conséquent les images sont encore renversées. Ainsi les images ne sont droites que quand l'objet est entre le miroir et le foyer principal.

Dans les recherches physiques, il est souvent important de déterminer les rayons des miroirs sphériques : pour ceux qui sont concaves, rien n'est plus facile ; il suffit d'exposer le miroir aux rayons solaires (*fig.* 81), d'en chercher le foyer au moyen d'un verre dépoli, et de mesurer la distance de ce point au miroir dans la direction de l'axe optique, ce sera la moitié du rayon. Mais pour les miroirs convexes, l'opération est beaucoup plus compliquée : il faut coller contre la surface une bande de papier noir, sur laquelle on pratique deux ouvertures circulaires A et B (*fig.* 82). Les rayons réfléchis divergent à partir d'un même point qui est le foyer principal ; on mesure leur écartement à différentes distances du miroir, et on en déduit facilement la distance F O qui est la moitié du rayon de la sphère.

761. Les miroirs concaves sont quelquefois employés pour produire de vives combustions, parce que la chaleur qui accompagne les rayons solaires est concentrée avec eux au même foyer ; mais comme le foyer des miroirs sphériques ne réunit que les rayons les plus voisins de l'axe optique, l'étendue du miroir augmente peu la température du foyer. En substituant aux miroirs sphériques des miroirs paraboliques, et en plaçant l'axe de figure parallèlement aux rayons solaires, tous les rayons reçus par le miroir se réunissent au foyer, et on obtient une température beaucoup plus élevée. Le Père Kirker imagina le premier de substituer aux miroirs courbes un système de miroirs plans disposés de manière à réunir tous les rayons réfléchis en un même point. Buffon fit construire un appareil semblable, composé de 68 glaces étamées, avec lequel il parvint à brûler du bois à 200 pieds de distance et à fondre du plomb et du cuivre à 45 pieds.

762. *Héliostat.* Cet appareil est destiné, comme nous l'avons dit, à réfléchir les rayons solaires dans une direction constante, malgré la variation de leur direction. Il est composé (*fig.* 83) d'un miroir plan métallique MM et d'une horloge qui fait marcher le miroir. Le miroir devant pouvoir prendre toutes les directions possibles est mobile autour de l'axe AA', et la tige qui supporte cet axe se meut sur elle-même. Pour que l'aiguille de l'horloge puisse conduire le miroir, elle porte à son extrémité une fourche qui peut tourner autour de l'axe r ; cette fourche soutient

un tuyau dans lequel passe à frottement libre une tige fixée perpendiculairement au miroir; ce tuyau est mobile autour d'un axe perpendiculaire à sa direction. Le cadran de l'horloge doit être dirigé parallèlement à l'équateur, et il doit y avoir entre la position de l'horloge et du miroir des rapports qui dépendent des lieux et des époques de l'année.

Instrumens formés d'une ou plusieurs lentilles.

763. *Lentilles.* Les microscopes simples sont des lentilles convergentes qui servent à examiner les objets de très-petite dimension; pour en concevoir l'utilité, il faut remarquer qu'un très-petit objet placé près de l'œil n'y produit qu'une image confuse, parce que les faisceaux de lumière envoyés par les différens points de cet objet ont une divergence trop grande pour qu'après avoir été réfractés daos l'œil, ils aillent concourir exactement sur la rétine; à la vérité, on pourrait détruire une partie de cette confusion, en plaçant contre l'œil une carte percée d'un très-petit trou, dont les bords arrêteraient les rayons trop divergens; mais la petite quantité de lumière que recevrait l'œil rendrait toujours l'objet peu distinct. Lorsque l'on place entre l'œil et l'objet une lentille convergente d'un court foyer, la divergence des rayons est diminuée, la vision est distincte, l'objet se trouve amplifié et beaucoup plus éclairé.

Pour déterminer les images vues à travers une loupe, il faudrait, d'après le même principe que pour les images réfléchies, construire les caustiques de tous les points de l'objet, mener par l'œil une tangente à chaque caustique dans un plan passant par son axe, et déterminer le lieu des images par le même procédé. Mais quand l'œil est à une petite distance, on peut sans erreur sensible considérer les images comme étant le lieu des foyers. D'après cela, il est facile de décrire tous les phénomènes que présente la vision à travers les lentilles; car leur effet est de former dans l'espace une image que l'on regarde directement.

764. Pour une lentille convergente, si l'objet AB est entre le foyer principal et la lentille (*fig.* 84), les foyers conjugués seront du même côté de la lentille mais plus éloignés; l'image $a'b'$ formée dans l'espace sera amplifiée et éloignée, et d'autant plus, que l'objet sera plus voisin du foyer principal. Si l'objet est au-delà du foyer principal (*fig.* 85), l'image $a'b'$ sera renversée et située de l'autre côté de la lentille. Pour une lentille divergente, quelle que soit la distance de l'objet à la lentille, l'image (*fig.* 86) sera toujours du même côté de la lentille, elle sera droite et plus petite.

765. Dans les diverses positions de l'objet, l'œil devra être à une distance déterminée de la lentille; car la distance de l'œil à l'image doit être égale à celle de la vision distincte. Il suit de là, que pour les lentilles convergentes il y a un *maximum* de grossissement qui ne peut pas être dépassé, pour que l'image soit nette; on l'obtient en

mettant l'objet assez en avant du foyer principal pour que l'image ne soit rejetée qu'à la distance de vision distincte qui est ordinairement de 22 centimètres; sans cette condition, une même lentille serait susceptible de donner un grossissement indéfini, car à mesure que *ab* s'approche du foyer principal (*fig.* 84) son image grandit et s'éloigne. Dans le cas de *maximum* de grossissement, en négligeant la distance de l'objet au foyer principal et la distance de l'œil à la lentille, l'image *a'b* est à l'objet *ab* comme la distance de vue distincte est à la distance focale principale.

766. *Aberration de sphéricité.* Dans ce qui précède nous avons supposé que les rayons qui partent d'un même point et traversent une lentille se réunissent rigoureusement en un même point : mais nous savons qu'il n'en est pas ainsi; ils se réunissent dans un espace dont l'étendue croît avec celle de la lentille; il en résulte que les images éprouvent une altération dans leurs formes, que l'on nomme *aberration de sphéricité*; on la diminue en employant des lentilles dont les faces ne soient qu'une très-petite portion de l'étendue des sphères auxquelles elles appartiennent. Souvent on se sert, pour diminuer l'étendue de la lentille, de bandes circulaires noircies qu'on nomme *diaphragmes*.

767. *Aberration de réfrangibilité.* Nous avons vu précédemment que les rayons de différentes couleurs ont des pouvoirs réfringens inégaux ; par conséquent, lorsqu'un objet lumineux est devant une lentille, chaque espèce de rayons forme une image séparée. Ces images ayant des positions et des grandeurs différentes, ne se superposent que dans une portion de leur étendue, et l'image que l'on aperçoit est bordée de franges irisées. Ce phénomène, surtout sensible dans les lunettes d'un fort grossissement, porte le nom d'*aberration de réfrangibilité*, et on appelle *lentilles achromatiques*, celles dans lesquelles on a corrigé cette aberration.

768. On parvient à établir l'achromatisme en faisant passer les rayons à travers plusieurs lentilles de substances inégalement réfrangibles. Pour concevoir leur influence, rappelons-nous que quand un faisceau de lumière blanche passe d'un milieu dans un autre, les rayons différemment colorés ayant des pouvoirs réfringens différens, se séparent et deviennent distincts. C'est l'écart entre les rayons extrêmes que l'on appelle *pouvoir dispersif*, et c'est la réfraction du rayon moyen qui détermine le pouvoir réfringent du corps. Il est évident, d'après cela, que si tous les rayons conservaient entre eux les mêmes rapports de réfraction, quel que fût le milieu réfractif, ou si la dispersion était proportionnelle à la réfraction du rayon moyen, les rayons une fois séparés ne pourraient être réunis qu'en passant à travers un système de milieux qui leur rendrait la direction qu'ils avaient avant d'avoir été séparés ; par conséquent, la lumière ne conserverait aucune déviation, et les corps réfringens ne pourraient modifier, en aucune manière, la lumière directe avec la condition de l'achromatisme. Mais il n'en est pas ainsi ; les rapports entre les réfractions des rayons ne sont pas les mêmes

dans les différens corps, et ils ne croissent pas proportionnellement à la réfraction du rayon moyen; par conséquent, le pouvoir dispersif ne suit pas les mêmes lois que la réfraction. Par exemple, le verre ordinaire (*crown-glass*) et le verre à base de plomb (*flint-glass*) ont des pouvoirs réfringens peu différens, tandis que le pouvoir dispersif du second est à celui du premier comme 3 : 2; ainsi l'huile de térébenthine réfracte moins que le crown-glass et disperse davantage. On conçoit, d'après cela, que si un faisceau de lumière blanche a été dévié et dispersé dans un milieu de verre ordinaire, on peut, en le faisant passer dans un second milieu de flint-glass, conserver une partie de la déviation et annuler la dispersion.

769. Cependant avec deux milieux différens on ne peut pas faire disparaître complètement les franges; on peut faire coïncider les rayons extrêmes, par exemple, mais les rayons intermédiaires ne coïncideront pas nécessairement; car dans les différens corps, les rapports de réfractions de ces différens rayons ne sont pas les mêmes; pour les faire coïncider il faudrait faire passer la lumière par une suite d'autant de milieux différens. Quand on emploie deux milieux, on achromatise le jaune et le rouge qui sont les couleurs les plus brillantes; quelquefois on en emploie trois, alors on fait coïncider les rayons rouges, jaunes et verts; on obtient ainsi un achromatisme bien suffisant.

770. On concevra facilement, d'après ce qui précède, la disposition des prismes et des lentilles achromatiques. Les substances que l'on emploie ordinairement sont le verre ordinaire et le verre qui renferme du plomb. Pour former un prisme achromatique, les deux prismes doivent être opposés (*fig.* 87); afin que les dispersions soient en sens contraire dans chacun d'eux, les lentilles achromatiques sont formées d'une lentille bi-convexe (*fig.* 88) et de crown-glass, et d'une lentille bi-concave de flint-glass: les angles des prismes ainsi que les rayons des sphères sont déterminés par les pouvoirs réfringens et dispersifs des deux matières vitreuses.

771. Newton, par suite de plusieurs expériences inexactes, avait cru que le pouvoir dispersif suivait les mêmes lois que la réfraction moyenne : il en résultait nécessairement que l'on ne pouvait détruire la dispersion sans ramener les rayons à leur direction primitive, et par conséquent que l'achromatisme était incompatible avec une déviation quelconque des rayons; cette erreur subsista long-temps. Euler soupçonna le premier la possibilité de l'achromatisme, par cette seule considération qu'elle existe dans le cristallin; mais c'est Jean Dollon, célèbre opticien anglais, qui constata le premier par l'expérience l'erreur de Newton et reconnut la possibilité de l'achromatisme en conservant un excès de réfraction.

772. Les instrumens que nous allons décrire, le microscope composé et les lunettes, sont formés de deux lentilles ou de deux systèmes de lentilles; l'un porte le nom d'*objectif*, l'autre celui d'*oculaire*; le premier reçoit les rayons de l'objet et forme

derrière lui une image amplifiée que l'on regarde avec une ou plusieurs loupes qui constituent l'oculaire. Ces lentilles doivent toujours être placées sur le même axe et solidement assujetties dans un tuyau formé de plusieurs pièces qui peuvent glisser les unes dans les autres, afin de faire varier la distance de l'oculaire à l'objectif; ce tuyau est noirci intérieurement afin d'absorber les rayons obliques qui viendraient frapper sa surface ; on place même dans l'intérieur du tuyau des diaphragmes circulaires noircis pour arrêter les rayons qui sont trop inclinés sur l'axe.

773. *Microscope composé.* Cet appareil se compose (*fig.* 89) d'une petite lentille A, d'un très-court foyer, au-devant de laquelle on place un très-petit objet mn, à une distance Ad plus grande que la distance focale principale Aa ; il se forme derrière la lentille et à une distance Ad', une image renversée et amplifiée $m'n'$, que l'on regarde avec l'oculaire B, placé de manière que la distance Bd' soit un peu plus petite que la distance focale principale Bb; on aperçoit alors une image $m''n''$ beaucoup plus grande; mais pour que l'image soit nette, il faut qu'elle soit à la distance de la vue distincte : on satisfait à cette condition en faisant varier la distance de l'oculaire à l'objectif.

774. L'instrument que nous venons de décrire renferme une imperfection intolérable, et d'autant plus que le grossissement est plus considérable ; c'est le défaut d'achromatisme de l'objectif ; il en résulte que l'image $m'n'$ et par suite l'image $m''n''$ sont garnies de franges irisées, qui rendent les contours des objets très-confus : ce défaut ne peut pas être corrigé par un système de lentilles de différens verres superposées, à cause de la grande courbure que doit avoir l'objectif, et par conséquent, de ses petites dimensions ; mais on est parvenu à diminuer beaucoup l'aberration de réfrangibilité au moyen d'une lentille intermédiaire que l'on place en avant de l'image $m'n'$; la marche des rayons est alors telle que l'indique la figure 90 : ce verre intermédiaire a pour objet de rassembler les rayons trop obliques, afin de donner plus de netteté à l'image ; mais son utilité principale est de faire disparaître les franges dont il est question. Pour concevoir comment il remplit ce dernier objet, il faut remarquer que quand une lentille reçoit un faisceau de lumière blanche, les images de différentes couleurs sont parallèles et d'inégales grandeurs (*fig.* 91) ; si l'œil se place en O sur l'axe, il apercevra des franges dans l'angle VOR ; mais si les grandeurs des images étaient proportionnelles à leurs distance à l'œil (*fig.* 92), il est évident qu'aucune frange ne serait visible ; or le calcul fait voir que l'on peut remplir cette condition au moyen d'une ou de plusieurs lentilles intermédiaires, dont les foyers et les distances aux autres sont déterminés ; cet oculaire achromatique porte le nom de *Campani*, qui l'a découvert.

775. Les microscopes sont généralement disposés comme l'indique la figure 93, le tuyau supérieur GE porte le système des oculaires ; il peut glisser à frottement

dans le tuyau FC, et celui-ci dans le tuyau BA dont l'extrémité inférieure porte l'objectif; DD est un diaphragme destiné à arrêter les rayons trop obliques, SS est le support sur lequel on place l'objet que l'on veut observer; on peut le rapprocher ou l'éloigner de l'oculaire au moyen d'une vis de rappel X; V représente un miroir destiné à éclairer fortement l'objet.

776. Pour chaque système de verre, le grossissement est évidemment d'autant plus grand que l'objet *m n* se rapproche davantage du foyer principal *a* (*fig.* 89). Mais il y a une limite de distance qui ne peut pas être dépassée; car il ne faut pas que l'image *m' n'* soit au-delà des oculaires. En faisant varier les dimensions des verres, le grossissement croît à mesure que l'objectif et l'oculaire ont un foyer plus court; mais ce grossissement ne peut pas non plus augmenter indéfiniment, 1° parce que l'objectif étant d'une très-petite dimension, il est impossible de diminuer indéfiniment son rayon; 2° parce que l'objectif diminuant, les rayons incidens deviennent très-obliques, ou bien il faut n'admettre qu'un faisceau de rayons trop petit pour éclairer suffisamment l'image *m' n'*; 3° parce que l'oculaire ne peut pas non plus diminuer indéfiniment d'étendue sans laisser échapper un grand nombre de rayons. Quant à la mesure du grossissement dans chaque cas particulier, nous décrirons bientôt un procédé très-ingénieux imaginé par M. Arago, et qui est applicable à tous les instrumens d'optique.

777. On peut, à l'aide du microscope, mesurer les dimensions absolues des corps; on y parvient facilement au moyen des dispositions suivantes : on place l'objet sur une lame de verre divisée par des lignes parallèles très-rapprochées, placées à des distances égales et connues les unes des autres, appareil qu'on désigne sous le nom de *micromètre*, et on observe au microscope combien l'objet couvre de ces divisions. Mais si l'objet a une certaine épaisseur, il est impossible de voir distinctement et l'objet et le micromètre; alors, pour remédier à cet inconvénient, on place un autre micromètre sur un diaphragme qui répond à l'image donnée par l'objectif, on observe combien l'image de l'objet occupe de divisions sur ce micromètre intérieur; ce nombre, divisé par le grossissement de l'objectif, donne la grandeur absolue de l'objet.

Les microscopes que nous venons de décrire présentent plusieurs graves inconvéniens : le premier est le défaut d'achromatisme de l'objectif, qui n'est jamais complètement compensé par les oculaires composés et la petitesse de son ouverture. Il en résulte que les images sont toujours garnies de franges, et que le faisceau de lumière admis étant toujours très-petit, les images sont faiblement éclairées, surtout pour de forts grossissemens. M. Selligue est parvenu à faire disparaître ces inconvéniens en employant des objectifs achromatiques, d'une dimension suffisante pour qu'ils puissent être construits avec exactitude, et il en porte le nombre jusqu'à 4 pour augmenter le grossissement. Ce nouvel instrument est beaucoup supérieur à

ceux dont on s'est servi jusqu'ici. (Voyez *Annales de Chimie et de Physique*, t. xxvii.) M. Amici a construit aussi un nouveau microscope; mais comme il est fondé sur les mêmes principes que les télescopes, nous n'en parlerons qu'après avoir décrit ces derniers.

778. *Lunette Astronomique.* La lunette astronomique la plus simple est composée de deux verres comme le microscope (*fig.* 89), seulement l'objectif a de plus grandes dimensions et peut être achromatisé; quant aux franges produites par l'oculaire, elles sont très-étroites et tout-à-fait insensibles, à cause du court chemin que la lumière parcourt après sa sortie. Cette disposition est représentée dans la figure 94; les objets se trouvant très-éloignés, l'image $m' n'$ se fait sensiblement au foyer principal de l'objectif. Comme pour les corps célestes l'idée de la grandeur n'est fondée que sur le diamètre apparent de l'image, attendu que l'éloignement ne permet d'avoir aucun sentiment distinct de leur distance précise, le grossissement est égal au rapport du diamètre apparent de l'image et de l'objet. Or, en supposant que l'objet soit assez éloigné pour que l'on puisse négliger, par rapport à sa distance à l'œil, la distance de la vision distincte, les angles visuels de l'objet et de son image sont $m\mathrm{A}n$ et $m''\mathrm{B}n''$ (*fig.* 89), et ces angles sont sensiblement dans le rapport des distances focales principales de l'objectif et de l'oculaire.

779. On emploie souvent cependant dans ces lunettes l'oculaire achromatique de Campani (*fig.* 90); mais quand l'instrument doit porter intérieurement des fils dans le lieu de l'image $m'' n''$, on dispose les deux oculaires de manière à ce que cette image soit en avant du second, afin que quand on fait mouvoir le système des oculaires, on ne dérange pas les fils : cette disposition est due à Ramsden.

780. *Lunettes Terrestres.* Les lunettes que nous venons de décrire renversent les objets; cela est sans aucun inconvénient pour les observations astronomiques; mais il n'en est pas de même des lunettes destinées à observer les objets terrestres; il est nécessaire que la dernière image soit droite : pour cela on compose l'oculaire de quatre verres (*fig.* 95); les deux premiers B et C ont pour objet de redresser l'image, et les deux derniers de compléter l'achromatisme; ils sont disposés comme dans l'oculaire de Campani ou de Ramsden. Le grossissement dépend des foyers des cinq verres et de l'intervalle qui les sépare; en laissant les deux derniers oculaires fixes et en faisant varier la position des autres dans de certaines limites, le grossissement variera; M. Cauchoix a établi ce mouvement dans de nouvelles lunettes qu'il nomme *polyaldes*; ce grossissement varie de 20 à 40 ou de 30 à 50.

781. *Lunette de Galilée.* Cette lunette (*fig.* 96) n'est composée que de deux verres; l'oculaire est une lentille divergente; il est placé en avant du lieu où l'image $m'n'$ se formerait. Les rayons, en traversant l'oculaire, se croisent et leur prolonge-

ment représente l'image droite $m'' n''$; dans ces lunettes, la position de l'œil la plus favorable est très-près de l'oculaire, car à mesure qu'il s'éloigne, il perd une partie des rayons ; cette disposition est employée pour les lunettes de spectacles, parce qu'elle permet de ne leur donner qu'une très-petite longueur; rarement on y emploie des objectifs achromatiques, parce qu'étant destinés à servir le soir, les couleurs qui s'y développent n'y sont pas très-vives, d'autant plus que leur grossissement n'est jamais fort considérable.

Appareils formés par un assemblage de Miroirs et de Lentilles.

782. *Télescope d'Herschell.* Cet appareil (*fig.* 97) est formé d'un tuyau au fond duquel se trouve un miroir métallique sphérique concave; les rayons émanés des objets extérieurs forment en avant du miroir une image $m' n'$ que l'on regarde avec une loupe ou avec un oculaire achromatique. Dans cette disposition, l'observateur intercepte une partie des rayons incidens; mais s'ils sont un peu inclinés de manière que l'image se forme hors de l'axe, et si le miroir est très-grand, la quantité de lumière interceptée est fort petite. C'est avec un appareil semblable, qui avait 40 pieds de foyer, que M. Herschell a fait une partie de ses découvertes.

783. *Télescope de Newton.* Cet instrument est encore composé d'un tuyau terminé par un miroir (*fig.* 98), mais il renferme un petit miroir plan incliné à 45° et qui rejette l'image $m' n'$ perpendiculairement à sa direction, de sorte qu'on peut l'observer par un oculaire situé parallèlement au tuyau; cette disposition évite ainsi l'interposition de l'observateur dans les rayons incidens et permet d'employer des miroirs de toutes dimensions; mais elle occasionne une perte de lumière considérable, par la réflexion sur le miroir plan. Newton lui avait substitué un prisme de verre rectangulaire (*fig.* 99); un des côtés de l'angle droit était disposé perpendiculairement à la direction des rayons incidens, il n'y avait ni absorption ni déviation. Cet instrument est très-incommode pour les recherches astronomiques, à cause de la position de l'observateur; les appareils suivans n'ont point cet inconvénient.

784. *Télescope de Gregori* (*fig.* 100). Le miroir plan du télescope de Newton est remplacé par un petit miroir concave, et le grand miroir est percé à son centre d'une ouverture qui reçoit l'oculaire; les rayons réfléchis sur le grand miroir forment une image $m' n'$; cette dernière, réfléchie dans le petit miroir, forme une autre image $m'' n''$ que l'on regarde directement avec l'oculaire.

785. *Télescope de Cassegrain.* Cet instrument ne diffère du précédent que par la forme du petit miroir qui est convexe; cette disposition a l'avantage de détruire les aberrations de sphéricité des deux miroirs, parce qu'elles sont en sens contraire.

(*fig.* 101) Il est évident que pour que l'image $m'' n''$ se forme, il faut que le petit miroir soit en avant du lieu où se formerait la première image; car les rayons reçus par le miroir convexe étant convergens, sont réfléchis sous une plus faible convergence et vont former l'image $m'' n''$.

Dans tous les télescopes, les miroirs métalliques doivent avoir le poli le plus parfait; le tuyau doit être noirci intérieurement.

786. M. Amici a construit sur le même principe que les télescopes dont nous venons de parler, des microscopes qui paraissent avoir un grand avantage sur ceux que nous avons décrits. Ils sont formés d'un tube de cuivre horizontal dont le fond est garni d'un miroir métallique elliptique, et l'autre extrémité d'un système d'oculaires. En avant d'un grand miroir métallique et dans l'intérieur du tube se trouve un petit miroir plan incliné à 45°; au-dessus du miroir le tuyau est percé d'une ouverture par laquelle arrivent les rayons émanés de l'objet, qui est placé au-dessous du tuyau à une distance suffisante pour qu'on puisse toujours l'éclairer fortement, ou par des miroirs ou par des lentilles : d'après cette description on concevra facilement la marche des rayons. Les rayons émanés de l'objet se réfléchissent sur le miroir plan, et après avoir éprouvé une nouvelle réflexion sur le miroir elliptique, se réunissent à son foyer et y forment une image que l'on regarde avec le système des oculaires. Le miroir est elliptique afin d'éviter l'aberration de sphéricité, mais il faut évidemment pour cela que l'image formée sur le miroir plan soit à un des foyers de la surface elliptique. Ces instrumens sont exempts d'aberration de sphéricité, et de réfrangibilité; ils ont sur ceux qui sont connus de nombreux avantages, tant pour le grossissement que pour la netteté des images. (Voyez, pour plus de détails, *Annales de Chimie et de Physique*, tom. XVII.)

Micromètres à doubles images.

787. Soit A et B (*fig.* 102) deux prismes égaux de spath d'Islande, de quartz ou de toute autre substance jouissant de la double réfraction, mais à un seul axe; supposons que le côté AA' du prisme A soit parallèle à l'axe, et que le côté du second prisme projeté en A' soit aussi parallèle à l'axe; ces prismes étant appliqués les uns contre les autres, comme l'indique la figure, il est évident que si un rayon de lumière parti du point L vient frapper la surface AB perpendiculairement à sa direction, le rayon pénétrera jusqu'à la surface de séparation des deux prismes sans éprouver ni déviation ni division, puisque l'axe de réfraction du premier prisme est perpendiculaire à la surface AB; mais au point d'incidence I' avec la surface du second prisme, comme l'axe est perpendiculaire au rayon lumineux, ce dernier se divisera en deux; le rayon

ordinaire continuera sa route sans éprouver de déviation, puisque les deux prismes sont de la même substance, et le rayon extraordinaire sera dévié à gauche ou à droite, suivant que l'axe sera répulsif ou attractif (685). Si l'objet lumineux est un seul point mathématique situé à une distance finie, l'œil ne pourrait pas recevoir les deux rayons émergens. Mais si le point lumineux est assez éloigné pour que l'on puisse considérer comme parallèles les rayons qui tombent sur la surface AB, l'œil situé en O recevra en même temps que le rayon direct L O, un rayon extraordinaire O *i'* provenant d'un autre rayon incident L*i*, et il apercevra deux images distinctes. Si l'objet avait des dimensions finies, il est évident que l'on apercevrait également deux images qui seraient plus ou moins écartées l'une de l'autre, suivant que la double réfraction des deux prismes serait plus ou moins énergique, et que l'angle réfringent serait plus ou moins grand. Cela posé,

Soit A (*fig.* 103) l'objectif d'une lunette dont l'axe optique prolongé rencontre la partie inférieure d'un objet SS'; soit F et F' les foyers des rayons envoyés par les points S et S', de sorte que F F' est l'image de SS'; plaçons en avant de cette image le double prisme dont nous venons de parler : les rayons ordinaires feront toujours leur foyer en FF', et les rayons extraordinaires formeront une autre image *ff'*, dont la distance à la première dépendra de la position du double prisme. En effet, l'angle F*c f* est constant; par conséquent, à mesure que le double prisme s'approche de la lentille A, les deux images s'écartent, et quand il s'en éloigne, elles se rapprochent; lorsque FF' coïncide avec *cc'*, les deux images se confondent, et si l'angle de déviation du prisme est plus grand que le diamètre apparent de l'objet SS' vu du point A, il y a toujours une position du prisme (*fig.* 104), pour laquelle les deux images sont tangentes; dans ce cas, l'image ordinaire se trouve comprise dans l'angle de déviation F *c f*; il en résulte qu'en mesurant la distance *c* F, on en déduira la grandeur de FF', et comme la distance focale de AF de l'objectif est connue, on pourra facilement calculer le diamètre apparent FAF'. Quand ce diamètre n'embrasse qu'un très-petit angle, on trouve par le calcul qu'il est proportionnel à la distance F*c*. Les lunettes qui sont pourvues de micromètres à doubles images, sont percées d'une fente longitudinale, afin de pouvoir faire mouvoir le double prisme dans l'étendue AF. Lorsqu'on veut mesurer le diamètre apparent d'un objet quelconque, on commence par déterminer la position du foyer, en faisant mouvoir le double prisme jusqu'à ce que les deux images coïncident parfaitement. On observe alors le point de la division latérale auquel correspond l'index des prismes; c'est le point à partir duquel il faut compter les distances F*c*; ensuite on éloigne les prismes jusqu'à ce que les deux images soient en contact : la distance de l'index dans ces deux positions est évidemment égale à F*c*; mais pour conclure le diamètre apparent de l'objet, il faut faire une fois pour toutes une semblable observation sur un objet dont on a déterminé d'avance

le diamètre apparent, ou par des opérations trigonométriques, ou en combinant son diamètre réel avec sa distance; on observerait alors la valeur de F*c* qui lui correspond, et par une simple proportion, on obtiendrait facilement le diamètre apparent de tous les autres corps lorsqu'on connaîtrait les distances F *c* qui leur correspondent. On pourrait même écrire d'avance ces diamètres sur le tuyau; mais on y indique ordinairement le rapport de la distance de l'objet à sa grandeur; de sorte que quand on connaît un de ces élémens, on peut en déduire l'autre. Ainsi d'après la taille counue d'un homme, on en déduirait son éloignement; mais ces évaluations sont d'autant moins exactes que l'objet est plus petit et plus éloigné.

Dans ce qui précède, nous n'avons pas parlé de l'oculaire; mais il est évident qu'il ne peut avoir aucune influence pour détruire le contact des images lorsqu'il existe, ou l'établir lorsqu'il n'existe pas. Une condition indispensable et dont nous n'avons point encore rien dit, c'est la superposition parfaite des deux prismes: comme il serait impossible de l'obtenir directement sans interposition d'air, on les colle avec de l'huile de térébenthine.

C'est à Rochon qu'on doit la découverte de ces micromètres: ils sont souvent employés dans les recherches astronomiques.

Détermination du grossissement dans les instrumens d'Optique.

788. Lorsqu'un instrument est destiné à observer des objets éloignés, le grossissement est égal au rapport du diamètre apparent de l'objet vu dans l'instrument et directement. Mais si l'objet est assez voisin pour que sa distance dans les deux cas puisse être comparée, il faut pour avoir le grossissement combiner le diamètre apparent avec la distance.

789. M. Arago a employé d'une manière très-ingénieuse les doubles prismes dont nous venons de parler pour obtenir le grossissement des diamètres apparens dans tous les instrumens d'optique. Ce procédé consiste à prendre un double prisme de cristal de roche tel que nous l'avons décrit (786); on le place derrière l'oculaire de l'instrument, et on regarde une mire circulaire éloignée et d'un diamètre connu; on aperçoit deux images distinctes; alors on s'approche ou on s'éloigne de la mire, jusqu'à ce que les deux images soient tangentes; dans cette position, les rayons partis des extrémités de l'objet sortent de l'instrument en faisant un angle égal à l'angle de déviation du prisme (786). Cet angle étant connu, il ne restera plus qu'à le diviser par le diamètre apparent de l'objet à l'œil nu, pour avoir le grossissement.

790. Pour déterminer exactement l'angle de déviation du prisme, on pourrait regarder la mire à l'œil nu à travers le double prisme, et se placer à la distance

convenable pour que les deux images soient en contact; l'angle de déviation serait égal au diamètre apparent de l'objet à cette distance : or, comme on connaît le diamètre de la mire et qu'on peut mesurer sa distance au prisme, on calculera facilement son diamètre apparent réel, et, par conséquent, la déviation cherchée. M. Arago, pour faire cette expérience plus exactement, regarde les deux images à travers une petite lunette, en plaçant le double prisme contre son objectif, et il donne à la mire une forme triangulaire, afin de choisir dans chaque expérience le diamètre qui convient le mieux au double prisme dont il veut déterminer la déviation.

791. L'application de cette méthode à la mesure du grossissement des microscopes, exige quelques détails. On commence par placer le double prisme sur l'oculaire, et on dispose, à la distance convenable de l'objectif, une plaque de verre sur laquelle on a tracé des lignes parallèles et également distantes, ce qu'on nomme un *micromètre objectif* (*fig.* 105); en regardant à travers le double prisme et l'instrument, on observe le nombre *m* des divisions RR' qui sont produites par la double réfraction; l'intervalle RR' sera évidemment le diamètre d'un objet, qui, à la distance D de la vision distincte, serait vu sous l'angle C de déviation du double prisme. La grandeur apparente de l'objet sera donc égale à D, multiplié par la tangente de C, et le grossissement sera égal à ce produit divisé par *m*.

Chambre obscure.

792. Si on place au volet d'une chambre une lentille convergente, et à son foyer un carton ou un verre dépoli, on y verra une image renversée des objets extérieurs; mais si on reçoit la lumière avant ou après son passage à travers la lentille sur un miroir, les images seront redressées. Les chambres obscures varient beaucoup dans leurs formes et leurs grandeurs, suivant l'objet auquel on les destine. Les figures 106 et 107 représentent les dispositions les plus ordinaires; dans la première, on reçoit l'image sur un carton, sur lequel on peut facilement en tracer les contours; dans la seconde, l'image est vue à travers une glace dépolie. M. Wolaston a remarqué que les lentilles les plus avantageuses étaient concaves vers l'objet et convexes vers le foyer, et M. Cauchoix a trouvé par expérience que le rapport des courbures le plus convenable pour les deux surfaces est celui de 5 à 8. Quelquefois on remplace la lentille et le miroir par un prisme de verre (*fig.* 108), dont la face inférieure BC est sphérique; les rayons qui entrent par AB se réfléchissent sur AC, et en sortant par la surface BC convergent comme à la sortie d'une lentille; cette disposition a l'avantage de donner des images beaucoup plus brillantes.

Mégascope.

793. Si l'on place dans le volet d'une chambre obscure une lentille convergente (*fig.* 109), et devant la lentille un objet éclairé par les rayons solaires, directs ou réfléchis, il se formera dans la chambre une image de l'objet dont la grandeur dépendra de la longueur focale de l'objectif, de la distance de l'objet à la lentille, et de la distance à laquelle on recevra l'image; cette image sera renversée, mais en renversant l'objet elle paraîtra droite. En employant un objectif achromatique et un grossissement de 2 à 20, on obtient des images très-nettes; cet instrument peut alors être utile dans les recherches de physique et d'histoire naturelle; c'est à M. Charles qu'on le doit.

La lanterne magique est un mégascope portatif; les objets sont peints sur des verres, et sont éclairés par une lampe.

La fantasmagorie n'est qu'une lanterne magique dont on fait varier la distance de l'objet au verre convergent et de l'appareil au tableau. La grosseur de l'image varie entre des limites très-étendues, et par conséquent elle paraît s'éloigner ou s'approcher : pour que l'illusion fût complète, il faudrait que la lumière de l'image subît les mêmes variations que sa grandeur; mais il n'en est pas ainsi, et la quantité de lumière varie exactement en sens contraire, puisque la lumière envoyée par la lampe est constante.

Microscope solaire.

794. Cet instrument ne diffère du mégascope qu'en ce qu'il est destiné à observer des objets de très-petite dimension; la lentille A (*fig.* 110) a un foyer très-court, et en avant on place un objet très-petit mn, un peu au-delà de la distance focale; alors il se forme une image amplifiée $m'n'$ que l'on peut recevoir sur un écran; mais pour que l'image soit brillante, il faut accumuler de la lumière sur l'objet; pour cela on place à l'extérieur (*fig.* 111) une lentille B qui reçoit les rayons solaires réfléchis par un miroir.

Chambre claire.

795. Si on taille un prisme à quatre faces (*fig.* 112), de manière que deux faces soient perpendiculaires et les deux autres tellement inclinées qu'elles réfléchissent toutes

deux les rayons entrés perpendiculairement à l'une des autres faces, et si l'on place l'œil en O, de manière que la moitié de la prunelle reçoive les rayons réfléchis dans le prisme et l'autre moitié les rayons émanés d'un papier placé au-dessous, il est évident que l'image des objets extérieurs se projettera droite sur le papier et que l'œil apercevra en même temps la pointe d'un crayon qu'on promènerait sur sa surface; par conséquent, au moyen de cet appareil, on pourra dessiner comme avec une chambre obscure. On pourrait aussi amplifier les images en les regardant avec une loupe. Cet ingénieux instrument est dû à M. Wolaston.

§ VI.

Sources de la Lumière.

795. Parmi les corps célestes, il n'y a que le soleil et les étoiles qui soient lumineux par eux-mêmes; les planètes ne le sont que par réflexion. La lumière que la terre reçoit du soleil est beaucoup plus grande que celle qu'elle reçoit des étoiles, probablement à cause de sa grande proximité comparée à celle de ces dernières. On concentre la lumière solaire dans un petit espace au moyen de miroirs sphériques ou paraboliques, ou au moyen de lentilles. Les rayons calorifiques qui accompagnent les rayons lumineux sont concentrés au même foyer; aussi ces dispositions sont souvent employées pour produire une température très-élevée.

796. Indépendamment des sources de lumière dont nous venons de parler et qui paraissent permanentes, il en existe encore deux autres, que nous sommes libres de produire à volonté, c'est l'électricité et une température très-élevée. Nous avons déjà suffisamment parlé de la première, nous donnerons seulement quelques détails sur la seconde.

797. Il paraît qu'en général toutes les fois que la température d'un corps dépasse 500°, il devient lumineux; ce phénomène s'explique d'une manière très-simple dans l'hypothèse où la lumière et la chaleur sont le résultat des vibrations d'un seul et même fluide, mais beaucoup plus rapides pour la lumière que pour la chaleur; cette même hypothèse rend facilement compte aussi de la chaleur qui accompagne souvent la lumière et de la transformation de la lumière en chaleur obscure. Quoi qu'il en soit, il résulte du fait que nous avons énoncé que tous les moyens artificiels propres à dégager de la chaleur, lorsqu'ils pourront atteindre ou dépasser la limite de température que nous avons assignée, produiront en même temps un dégagement de lumière. Ainsi le frottement, le choc et les actions chimiques sont aussi des sources de lumière.

Parmi les actions chimiqoes, la combnstion est la senle qoe l'on emploie pour produire la lumière artificielle ; nous avons déjà dit en qnoi elle consiste (449) ; nous donnerons ici quelqnes détails sor les appareils d'éclairage.

Les corps qui sont fixes, c'est-à-dire, qui, aux températures qoe nous pouvons produire, conservent leur état solide ou liquide, ne développent que peu de lumière par leur combustion dans l'air ; mais les gaz en dégagent beaucoup : les derniers en brûlant produisent une flamme qui est le lieu de leur combustion. Ainsi les corps qui donnent une grande lumière par leur combustion, sont les gaz et les corps solides ou liquides qui peuvent se vaporiser à la températore qne produit leur combustion, ou du moins, dégager des gaz ou des vapeurs combustibles.

Les corps dont on se sert pour l'éclairage sont les matières grasses végétales ou animales, et le gaz hydrogène carboné provenant de la distillation de la bouille ou des huiles. Lorsque les matières sont solides, on en forme des cylindres dont l'axe est occupé par une matière solide très-poreuse, qu'on nomme mèche ; lorsque la mèche est enflammée, elle fond la matière solide à une distance plus ou moins considérable, la matière liquéfiée monte dans la mèche par la capillarité, se décompose par la chaleur qu'elle y éprouve et donne naissance à nn dégagement de gaz hydrogène carboné qui en brûlant produit la flamme. On peut facilement observer ce dégagement de gaz, en éteignant la flamme d'one bougie de manière qne l'extrémité de la mèche reste encore incandescente ; on aperçoit une fumée blanche très-combustible. Dans les lampes alimentées par des matières liquides, l'huile s'élève dans la mèche, y éprouve la même décomposition qui produit le même effet. Quant aux appareils dans lesquels on brûle le gaz bydrogène carboné, ils consistent en un petit réservoir percé d'un orifice plus ou moins capillaire par lequel s'échappe le gaz et qu'on enflamme à sa sortie. Ainsi dans tous ces modes d'éclairage, la flamme est produite par la combustion du gaz hydrogène carbuné ; ce gaz est préparé d'avance dans le nooveau système d'éclairage, et il se forme dans la mèche lorsqu'on emploie des matières combustibles, solides ou liquides.

Les appareils dont nous venons de parler sont les plus simples, mais ils ont sonvent l'inconvénient de ne pas brûler la totalité des gaz qui se dégagent, et par conséquent de donner de la fumée, souvent d'une odeur désagréable, et de consommer infructueosement une partie de la matière combustible. Argand est parvenu, au moyen d'une disposition très-simple et maintenant généralement usitée, à faire disparaître complètement ces inconvéniens. Les lampes d'Argand sont formées de deux tnyaux cylindriques concentriques ; l'intervalle qui les sépare fermé inférieorement, communique avec le réservoir d'huile ; dans cet intervalle, on place une mèche circulaire qui monte ou descénd à l'aide d'nne crémaillère ; le courant d'air arrive et par le cylindre intérieur et autour du cylindre extérieur ; on conçoit que par cette dis-

position, la flamme étant très-mince et enveloppée par deux courans d'air, la combustion doit être beaucoup plus complète; mais elle est rendue plus complète encore et plus active au moyen de la cheminée de verre qui entoure la flamme; le courant d'air devient plus rapide par le tirage qu'elle produit, et le coude que renferme la cheminée, en réfléchissant de la chaleur sur la flamme elle-même, contribue à favoriser la combustion. Quand la distance du niveau de l'huile à l'extrémité de la mèche, celle de l'extrémité de la mèche au coude de la cheminée et la hauteur de la cheminée sont disposées convenablement, l'appareil ne donne aucune fumée et produit le maximum de lumière que l'on peut obtenir de l'huile consommée. La mèche et la cheminée pouvant se mouvoir facilement, on peut toujours les placer de la manière la plus avantageuse; mais le niveau de l'huile doit rester constant pour que la lumière ne diminue pas. Dans les appareils ordinaires, cette condition n'est jamais remplie; aussi au bout d'un certain temps la mèche se charbonne, il se dégage de la fumée, et la lumière diminue. La lampe hydro-statique que nous avons décrite (316), satisfait parfaitement à la condition dont il s'agit. M. Carcel et M. Gagniard ont rempli le même objet au moyen de petites pompes placées dans le pied de la lampe et qui sont mues par un mouvement de pendule que l'on remonte tous les jours.

798. Pour augmenter l'intensité de la lumière que l'on place sur les phares et pour la rendre visible à une plus grande distance, on dispose derrière les lampes des miroirs paraboliques qui renvoient la lumière dans la direction de leur axe; mais comme le champ lumineux est très-peu étendu, on place plusieurs appareils semblables autour d'un axe qui tourne régulièrement sur lui-même; cette disposition porte le nom de *phanaux à éclipses*. M. Bordier Marcet, dans ces derniers temps, a beaucoup perfectionné ce système d'éclairage, en conservant toujours le système des réflecteurs. M. Fresnel a construit un appareil destiné au même usage, mais qui est fondé sur un autre principe. Il consiste en huit grands verres lenticulaires carrés, formant par leur réunion un prisme octogone dont le centre est le foyer commun des lentilles; en ce point est placée la lumière unique qui éclaire le phare; elle est produite par un bec de lampe à trois mèches concentriques, lequel équivaut à dix-sept lampes de Carcel pour la lumière et l'huile consommée: les rayons émanés de ce foyer sont ramenés au parallélisme par les verres lenticulaires; ces derniers sont formés de plusieurs portions de lentilles disposées circulairement et ayant le même foyer. Cet appareil est à éclipse, par conséquent il tourne sur lui-même. La lumière de ces phares est visible à une distance de 16,000 toises. Avec une lampe quadruple, MM. Arago et Matthieu l'ont aperçue de jour, avec une lunette, à 17 lieues: une heure après le coucher du soleil on l'apercevait à l'œil nu; elle paraissait aussi brillante qu'un appareil anglais à feu fixe éloigné de 5 lieues.

La lumière qui se dégage dans les différentes circonstances dont nous venons de

parler, est toujours accompagnée de chaleur; mais il existe un grand nombre de corps organiques ou inorganiques qui deviennent lumineux dans certaines circonstances sans développer de chaleur sensible. Tels sont le lampyre, ver luisant, et un grand nombre de zoophytes. La combustion lente du phosphore dans l'air produit de la lumière sans dégagement sensible de chaleur; le bois pourri, la chair de poisson deviennent aussi quelquefois lumineux sans dégager de chaleur. Un grand nombre de corps deviennent aussi lumineux lorsqu'ils ont été exposés à une température suffisante ou à l'action des rayons solaires; tels sont: le spath-fluor, le phosphore de Bologne (sulfate de barite), etc.; on les désigne sous le nom de *phosphorescens*.

M. Becquerel possède une pierre qui jouit de propriétés encore plus singulières. C'est une espèce de chaux fluatée qu'on a trouvée en Sibérie dans des rochers granitiques.

Cette pierre, quand on la place dans l'obscurité, jouit d'une lumière phosphorique très-remarquable, et qui augmente à mesure que sa température s'élève. Toutes choses égales d'ailleurs, son éclat devient plus considérable quand on la place dans l'eau. M. Becquerel l'ayant placée dans l'eau bouillante, l'a vue devenir tellement lumineuse, qu'on pouvait distinguer des caractères d'imprimerie près du vase qui la contenait. Dans l'huile bouillante, l'effet a été encore augmenté. Enfin, dans le mercure bouillant, où elle se trouve élevée à une température de 250°, elle jette un éclat si vif, qu'on peut lire à une distance de cinq pouces. M. Becquerel, malgré le désir qu'il éprouvait de constater les effets que produirait une température plus élevée, n'a pas osé tenter des essais qui auraient nécessité le sacrifice de la pierre.

Cette observation curieuse pourrait rendre vraisemblable le récit de J^e Mondeville, auteur d'un voyage fait au milieu du 15e siècle dans l'Asie centrale. Il raconte qu'il trouva à l'entrée d'une ville de la Grande Tartarie, deux colonnes surmontées de pierres qui jetaient un vif éclat dans l'obscurité. Jusqu'ici son récit avait été placé au rang des fables, mais aujourd'hui n'a-t-on pas quelque raison de croire qu'il a bien pu ne pas mentir?

RÉSUMÉ DU CHAPITRE V.

Lumière.

Phénomènes Généraux.

TRANSMISSION.	La lumière se transmet en ligne droite. L'intensité de la lumière décroît comme le carré de la distance. Mesure de l'intensité de deux lumières: La vitesse de la lumière est de 70,000 lieues par seconde. L'ombre d'un corps éclairé par un point lumineux est l'espace renfermé entre la surface postérieure du corps et la surface d'un cône tangent au corps mené par le point lumineux. La pénombre est l'espace compris entre les deux cônes tangens au corps lumineux et au corps opaque. L'intensité de la lumière d'un rayon émis par un corps est proportionnelle au sinus de son inclinaison sur la surface du corps.
RÉFLEXION.	Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante; et l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. Les rayons réfléchis sur une surface plane étant prolongés, vont passer par un point situé sur la perpendiculaire abaissée du point lumineux sur le miroir, et à une distance du miroir égale à celle du point lumineux. Les rayons réfléchis sur un miroir sphérique concave se réunissent sensiblement en un point situé en avant du miroir sur le diamètre qui passe par le point lumineux et qu'on nomme *foyer*. Lorsque les rayons sont parallèles, le point de réunion porte le nom de *foyer principal*; il est situé à une distance du miroir égale à la moitié du rayon. Dans tous les autres cas, le point lumineux et le foyer, qu'on désigne aussi sous le nom de *foyers conjugués*, dépendent l'un de l'autre, suivant une loi très-simple. Lorsque l'objet lumineux a une certaine étendue, le lieu des images de tous ces points forme dans l'espace une image de l'objet que l'on peut apercevoir en la recevant sur un corps opaque blanc. Les rayons réfléchis sur un miroir convexe divergent à partir de la surface du miroir, et par conséquent ne forment point de foyers réels; mais les rayons étant supposés prolongés, se réunissent derrière le miroir et forment un foyer imaginaire, analogue à celui des miroirs plans.
RÉFRACTION.	On désigne ainsi la déviation qu'éprouve un rayon lumineux en passant du vide dans un corps, ou d'un corps dans un autre. Le sinus de l'angle d'incidence est au sinus de réfraction dans un rapport constant pour le passage de la lumière du vide dans un même corps ou d'un corps dans un autre. Lorsque des rayons lumineux pénètrent dans un milieu plus réfringent, terminé par une surface convexe, ils deviennent convergens, et divergens si la surface du second milieu est concave. Lorsqu'un rayon lumineux se présente pour entrer dans un milieu moins réfringent, il y a toujours une limite de l'angle d'incidence au-delà de laquelle la réfraction se change en réflexion; il résulte de là que quand une substance réfringente a une forme angulaire, il existe toujours pour cet angle une limite au-delà de laquelle aucun rayon ne peut la traverser.

RÉFRACTION.

Lorsqu'un rayon traverse un prisme, le rayon émergent se rapproche de la base du prisme.

Lentille. On désigne sous le nom de *lentilles* des masses de matières transparentes, terminées par des portions de surfaces sphériques ; celles qui sont plus épaisses au centre que vers les bords portent le nom de *Lentilles convergentes*, parce qu'elles rapprochent les rayons qui les traversent ; celles qui au contraire sont plus épaisses vers le bord qu'au centre, portent le nom de *Lentilles divergentes*, parce qu'elles écartent les rayons qui les traversent.

Les rayons qui passent à travers les lentilles forment des foyers réels ou imaginaires, comme les rayons qui sont réfléchis sur les miroirs. Les foyers des lentilles divergentes sont toujours imaginaires, à moins que les rayons ne soient convergens avant de les traverser. On appelle foyer principal celui des rayons parallèles.

Indice de réfraction. On mesure l'indice de réfraction d'une substance en construisant un prisme avec cette substance et observant la déviation qu'il fait éprouver à un rayon lumineux. L'indice cherché dépend de cette déviation et de l'angle réfringent du prisme.

DISPERSION.

Lorsqu'un faisceau de lumière blanche sort d'un milieu réfringent dans une direction qui n'est point parallèle à son incidence, le rayon émergent est dilaté et présente toutes les couleurs de l'iris.

Si on reçoit dans une chambre obscure et sur un carton blanc, l'image du soleil réfracté à travers un prisme, on observe 1° que cette image est alongée ; 2° qu'elle est composée de bandes colorées parallèles aux arêtes du prisme ; 3° que les couleurs se succèdent dans l'ordre suivant : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet ; 4° que la bande violette occupe toujours la partie du spectre la plus voisine de la base du prime.

Ces phénomènes s'expliquent dans le système de l'émission, en admettant 1° que la lumière blanche est formée de la réunion d'une infinité de rayons colorés ; 2° que chaque rayon coloré a un pouvoir réfringent différent. On démontre 1° que les rayons colorés n'ont pas un pouvoir réfringent égal, parce que s'il en était ainsi, il y aurait toujours une position du prisme pour laquelle le spectre solaire serait circulaire, ce qui n'existe pas ; 2° que chaque rayon coloré ne peut pas être divisé et a un pouvoir réfringent différent ; en isolant un ou plusieurs rayons et les réfractant séparément à travers un même prisme, la déviation differe pour chacun d'eux ; 3° que tous les rayons colorés réunis forment de la lumière blanche, en regardant le spectre avec un prisme égal à celui qui l'a formé, ou en concentrant le spectre solaire au foyer d'une lentille, et le recevant sur un carton ou un verre dépoli.

Tous les rayons du spectre sont simples ; il en existe réellement un nombre infini ; les couleurs des corps résultent presque toujours de la réunion de plusieurs rayons simples ; on le reconnait facilement en les regardant à travers un prisme. On appelle couleurs complémentaires celles qui étant réunies forment de la lumière blanche.

Le rapport des indices de réfraction des différens rayons n'est pas le même pour tous les corps, par conséquent le spectre solaire provenant de prismes de différentes substances ne sont pas semblables, et la dispersion totale, c'est-à-dire l'écart des rayons extrêmes, n'est pas proportionnelle à la réfraction moyenne.

Les rayons colorés étant inégalement réfrangibles, doivent se réfléchir à la seconde surface des corps réfringens sous des angles différens ; c'est en effet ce qu'on observe.

DISPERSION.	Les différentes parties du spectre ont des propriétés éclairante, calorifique, chimique et magnétique différentes. Le maximum de propriété éclairante est dans les rayons jaunes; le maximum de chaleur se trouve dans les rayons rouges; le maximum d'action chimique dans le rayon violet; les rayons les plus réfrangibles jouissent de la propriété de communiquer un magnétisme durable aux aiguilles d'acier.
COLORATION DE LA LUMIÈRE EN PASSANT A TRAVERS LES LAMES MINCES.	Lorsqu'on place une lentille d'un grand foyer sur un verre plan, et qu'on éclaire l'appareil par des rayons homogènes, en recevant les rayons réfléchis ou réfractés, on aperçoit une série d'anneaux alternativement obscurs et brillans: la distance des anneaux varie avec la couleur de la lumière. Si on éclaire avec de la lumière blanche, on aperçoit des anneaux irisés provenant de la superposition des anneaux de couleur simple. Cet effet provient du passage de la lumière à travers la lame d'air qui sépare la lentille du prisme. Une lame mince de toute autre substance diaphane produit des phénomènes semblables; les autres anneaux colorés par réflexion pour tous les rayons correspondent à des épaisseurs de la lame mince qui sont entre elles comme les nombres 1, 3, 5, 7, etc.; pour les anneaux réfractés, les épaisseurs sont comme les nombres 0, 2, 4, 6, etc. Les largeurs des anneaux décroissent depuis le rouge jusqu'au violet.
DIFFRACTION.	Lorsqu'on place dans un faisceau de lumière homogène un corps opaque, et qu'on reçoit son ombre sur un carton blanc, on remarque qu'elle est bordée de franges; leur largeur varie avec la couleur du rayon; si le corps est très-mince, on aperçoit des franges dans son ombre, qui paraît alors divisée en bandes obscures et brillantes. Lorsque le corps est éclairé par de la lumière blanche, les bandes brillantes sont irisées par la superposition des bandes des couleurs simples; l'ordre des couleurs est la même que dans les anneaux colorés. Si on laisse pénétrer de la lumière homogène par une très-petite ouverture, l'image renferme une tache centrale colorée, environnée d'anneaux successivement noirs et colorés, dont l'étendue totale est beaucoup plus grande que celle qui résulterait de la projection cônique de l'ouverture. Les anneaux sont placés sur des cônes curvilignes dont la convexité est tournée au dehors; en opérant sur de la lumière blanche, les anneaux deviendraient irisés. Ces phénomènes deviennent d'autant plus sensibles que le corps est plus étroit ou que l'ouverture est d'un plus petit diamètre. Il résulte de là 1° que les rayons sont infléchis en passant dans le voisinage des corps opaques; 2° que cette inflexion s'étend sur une grande partie de la trajectoire décrite par le rayon; 3° qu'elle est différente pour les rayons de différente couleur; 4° que les rayons déviés en sens contraire, ou par les faces en regard de deux corps ou d'une même ouverture exercent une influence réciproque; 5° qu'une partie des rayons pénètre dans l'ombre géométrique des corps; 6° que quand les rayons déviés vers l'ombre de deux faces opposées se rencontrent, ils exercent l'un sur l'autre une influence réciproque; 7° ces phénomènes sont indépendans de la nature du corps autour duquel la lumière est déviée.
DOUBLE RÉFRACTION.	Tous les corps cristallisés, dont la forme primitive n'est ni un tétraèdre ni un octaèdre, jouissent de la propriété de donner deux images des objets qu'on regarde à travers leur épaisseur; par conséquent, un rayon incident qui les pénètre se divise en deux, un des rayons suit les lois ordinaires de la réfraction, l'autre suit des lois différentes. Dans certains cristaux tout se passe de la même manière autour d'une ligne qu'on nomme *axe principal*, dans les autres il y a deux lignes qui jouissent de la même propriété; dans les cristaux à un

DOUBLE RÉFRACTION.

aae tous les phénomènes se passent comme s'il émanait de l'aae une force attractive ou une force répulsive.

Si on taille un cristal perpendiculairement à l'axe, un rayon incident perpendiculaire à cette face n'éprouverait aucune déviation ; mais s'il est incliné, les deux rayons réfractés seront dans le plan d'incidence. Si on donne au cristal une face parallèle à l'aae, tous les rayons incidens situés dans un plan perpendiculaire à l'aae donneront des rayons réfractés situés dans le même plan. Dans ce cas l'indice de réfraction extraordinaire est constant, mais il diffère de celui des rayons ordinaires.

Dans les cristaux à deux aaes aucun des rayons ne suit les lois ordinaires de la réfraction.

POLARISATION.

Lorsqu'on reçoit sur un second cristal les rayons ordinaires ou extraordinaires à leur sortie d'un premier cristal, on remarque 1° que toutes les fois que les sections principales sont parallèles ou perpendiculaires, on n'obtient qu'une seule image ; mais chacun des rayons en donne deux si les sections sont inclinées : ainsi la lumière qui a traversé un cristal à double réfraction, diffère complètement de la lumière blanche ; la modification qu'elle a éprouvée porte le nom de *polarisation* ; on appelle le plan de polarisation la direction de la section principale du cristal dont le rayon serait émergent ordinairement.

La lumière peut être encore polarisée par réflexion et par réfraction simple. Le verre polarise la lumière sous un angle de réflexion de 35°, l'eau sous un angle de 37°, et en général sous une incidence telle que le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté ; le plan de polarisation est celui du plan de réflexion ; les métaux sont de tous les corps ceux qui polarisent le moins la lumière. Les corps transparens polarisent aussi la lumière par réfraction, et d'autant plus que les rayons sont plus inclinés sur la surface ; mais la polarisation n'est jamais complète, à moins qu'on ne lui fasse traverser successivement plusieurs plaques parallèles ; les rayons transmis sont polarisés dans un sens perpendiculaire à ceux des rayons réfléchis.

Les rayons polarisés ne peuvent pas donner de lumière dont le plan de polarisation soit perpendiculaire. C'est ce qui résulte de l'unité d'image, lorsqu'on le fait passer au rayon polarisé à travers un cristal dont la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation du rayon ; il suit de là que si on reçoit un rayon polarisé sur une glace inclinée à 35° et dont le plan soit parallèle au plan de polarisation du rayon, il n'y aura point de lumière réfléchie, car elle serait polarisée dans un plan perpendiculaire au plan de polarisation du rayon incident. Lorsqu'un rayon de lumière polarisé traverse une lame mince cristallisée dont la section principale n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan primitif de polarisation, les deux images sont colorées de teintes complémentaires ; la teinte des deux images varie avec l'épaisseur de la lame.

Explication des Phénomènes dans le système de l'Émission.

Newton admet que les corps lumineux lancent dans l'espace environnant des molécules d'une ténuité extrême ; la vitesse des molécules est alors égale à celle de la transmission de la lumière ; la sensation de la lumière provient du choc de ces molécules, l'obscurité de leur absence.

L'ombre et la pénombre sont rigoureusement déterminées par des cônes tangens.

La réflexion s'explique en admettant de la part de tous les corps une action répulsive qui ne s'exerce sur les molécules lumineuses qu'à une très-petite distance.

La réfraction s'explique en admettant une action répulsive exercée sur d'autres molécules de même nature que les forces qui produisent la réfraction. Dans ce système la vitesse de la lumière augmente dans le milieu réfringent, et l'indice de réfraction est égal au rapport de

la vitesse de la lumière dans le corps et dans le vide, ou dans le second et le premier corps.
On appelle pouvoir réfringent une quantité proportionnelle à l'intensité de la force accélératrice; n étant l'indice de réfraction, $n^2 - 1$ est le pouvoir réfringent.
La dispersion est une conséquence nécessaire des différences de pouvoirs réfringens des rayons colorés.
La décomposition de la lumière en traversant les lames minces, s'explique en admettant que les molécules lumineuses, dans leur marche, passent successivement par des accès de facile réflexion et de facile transmission, dont la longueur est constante pour un même rayon, et varie avec sa couleur, avec les pouvoirs réfringens des corps que parcourt la lumière et avec l'obliquité des rayons.
Enfin, dans la polarisation on admet que les molécules lumineuses ont leurs axes semblables dirigés dans un même plan, qui est celui de polarisation. La polarisation mobile admise par M. Biot, pour expliquer la coloration des rayons polarisés en passant à travers des lames minces cristallisées, ne paraît pas exacte, car les lames minces polarisent la lumière comme les plaques épaisses.

Explication des Phénomènes dans le système des Vibrations.

Dans ce système, l'espace est rempli d'un fluide très-subtil, désigné sous le nom d'*Éther*. L'émission de la lumière, sa propagation et la sensation sont absolument semblables aux phénomènes correspondans dans la théorie du son. Les ondes ont des longueurs inégales, correspondantes aux différentes couleurs, mais la vitesse de propagation est la même. Toutes les propriétés de la lumière résultent du principe des interférences et de la loi d'Huyghens, qui sont tous deux des conséquences nécessaires de l'existence des ondes.
Interférence. Lorsque deux systèmes d'ondes parallèles de même longueur partent ensemble, ou que l'une est en retard sur l'autre d'un nombre pair de demi-ondulations, les deux systèmes se renforcent mutuellement; mais si l'un est en retard d'un nombre impair de demi-ondulations, les deux systèmes se détruisent mutuellement. Si les deux systèmes d'ondes sont inclinés, chaque onde se trouve divisée en bandes égales alternativement brillantes et obscures.
Principe d'Huyghens. Il consiste en ce que les vibrations d'un point d'une onde peuvent être considérées comme résultant des ondes élémentaires envoyées par tous les points de cette onde dans l'une quelconque de ses positions antérieures.
Tous les phénomènes de la diffraction s'expliquent avec la plus grande précision au moyen de ces deux principes.
Les lois de la réflexion dérivent de ce que les rayons doivent parcourir des chemins égaux pour arriver d'une onde incidente à une onde réfléchie.
Les lois de la réfraction dérivent de ce que les chemins parcourus par les rayons depuis une onde incidente jusqu'à une onde réfractée doivent l'être dans le même temps.
La dispersion résulte de ce que les ondes d'inégales longueurs ont des indices de réfraction différens.
La décomposition de la lumière à travers les lames minces résulte de l'interférence des rayons réfléchis sur les deux surfaces, ou de celle qui est transmise directement avec celle qui ne l'est qu'après avoir éprouvé deux réflexions.
La double réfraction et la polarisation résultent de la décomposition des mouvemens des ondes en deux systèmes de mouvemens rectangulaires parallèles à la direction des ondes.
La polarisation colorée résulte de l'interférence des rayons ordinaires et extraordinaires.

Météores lumineux.

Le crépuscule provient de la réflexion des parties supérieures de l'atmosphère;
La déviation que les rayons éprouvent en traversant l'atmosphère, de la réfraction de l'air qui croît à mesure que les couches sont plus voisines de la terre;
Le mirage, de l'échauffement des couches d'air qui sont en contact avec le sol et qui réfléchissent la lumière qui se présente sous une petite incidence.
L'arc-en-ciel a toujours son centre sur la ligne menée par le centre du soleil et l'œil de l'observateur; l'arc intérieur provient des rayons réfractés dans les gouttes d'eau et qui sortent après une seule réflexion intérieure; l'arc extérieur provient des rayons qui ne deviennent émergens

qu'après deux réflexions intérieures. L'arc est coloré parce que la lumière se disperse en sortant des gouttes d'eau. Tout l'espace occupé par le nuage qui se réduit en eau n'est pas coloré, parce que tous les rayons réfractés dans chaque goutte d'eau ne sont pas visibles, il n'y a que ceux qui sont sensiblement parallèles ; par conséquent, pour chaque position de l'œil il n'y a que les rayons émis par certains globules qui sont aperçus ; chaque point du soleil donne un arc distinct ; c'est la superposition de tous ces arcs qui forme celui qu'on aperçoit.

Les couronnes, les parélies et les aurores boréales n'ont encore aucune explication satisfaisante.

Vision.

L'organe de la vision est principalement composé de l'enveloppe extérieure qui comprend la cornée transparente et la cornée opaque, de la pupille, du cristallin, de la rétine et des humeurs aqueuse et vitrée. Les rayons qui arrivent sur la cornée transparente, convergent en traversant l'humeur aqueuse ; les rayons trop obliques sont arrêtés par l'iris, ceux qui sont reçus par la pupille sont encore rendus plus convergens en passant au travers du cristallin et vont former sur la rétine une image renversée des objets extérieurs, le nerf optique transmet la sensation au cerveau.

Les objets sont toujours rapportés au sommet du cône de lumière dont la base s'appuie sur la cornée transparente. Quand on regarde avec un seul œil, c'est l'angle de ces rayons qui fait juger de la distance ; quand on regarde avec les deux yeux, c'est l'angle des deux faisceaux qui fait estimer la distance de l'objet.

La pupille se dilate ou se contracte pour augmenter ou diminuer la quantité de lumière admise dans l'œil suivant son intensité ; elle est très-dilatée lorsqu'on est placé dans un endroit obscur, et très-rétrécie dans le cas contraire.

La sensation est simple, quoiqu'il se forme une image sur chaque rétine, parce que la sensation se fait dans le cerveau et que les nerfs optiques des deux yeux se réunissent avant d'y arriver ; mais il faut pour cela que les images se forment sur les parties symétriques des deux rétines, autrement on aperçoit deux images.

La grande étendue dans laquelle la vision est distincte, est jusqu'ici sans explication. Dans l'œil il n'y a ni aberration de sphéricité, ni aberration de réfrangibilité.

On corrige les vues courtes en plaçant devant l'œil une lentille divergente, qui augmentant la divergence des rayons émanés de points éloignés, les rend tels qu'ils seraient s'ils partaient d'un objet voisin de l'œil. On corrige les vues longues en plaçant devant l'œil une lentille convergente : les rayons partis des objets voisins devenant moins convergens, tout se passe comme si ces objets étaient éloignés.

Instrumens d'Optique.

INSTRUMENS DE RÉFLEXION.

Miroirs plans. L'objet et son image sont de même grandeur et symétriquement placés par rapport au miroir. — Images multiples dans deux glaces parallèles, dans une même glace étamée, dans deux miroirs inclinés.

Miroirs courbes. Les images diffèrent en général de celles qui se forment dans l'espace ; elles varient avec la position de l'œil. On peut cependant, dans le plus grand nombre de cas, les considérer comme identiques avec celles qui sont le lieu des sommets des caustiques. Dans les miroirs convexes, ces images sont toujours droites et plus petites que l'objet. Dans les miroirs concaves, elles sont d'autant plus grandes que l'objet s'approche davantage du centre ; elles sont droites et derrière le miroir quand l'objet est entre le miroir et le foyer principal ; elles sont renversées et en avant du miroir pour toute autre position de l'objet.

INSTRUMENS FORMÉS D'UNE OU PLUSIEURS LENTILLES.

Lentilles. Une seule lentille interposée entre l'œil et l'objet forme une image que l'œil regarde directement ; cette image est du même côté que l'objet, quand ce dernier est à une distance de la lentille plus petite que la distance focale principale ; elle est de l'autre côté dans le cas contraire. L'image est d'autant plus grande que l'objet est

INSTRUMENS FORMÉS D'UNE OU PLUSIEURS LENTILLES.	plus voisin du foyer; mais comme l'image, pour être distincte, ne doit être éloignée de l'œil que de la distance de la vue distincte, il y a une limite de grossissement qui ne peut pas être dépassée. Dans la vision à travers les lentilles, les images sont déformées et irisées; elles sont déformées, parce que les rayons ne font pas leurs foyers en un même point; elles sont colorées, parce que chaque rayon d'une même couleur forme une image distincte de celles formées par les autres rayons. On corrige l'aberration de sphéricité en employant des lentilles dont la surface n'est qu'une petite portion de l'étendue de la sphère à laquelle elles appartiennent. On corrige l'aberration de réfrangibilité au moyen de plusieurs lentilles, les unes convergentes et les autres divergentes, qui ont même pouvoir dispersif, mais qui ont un pouvoir réfractif différent. Tous les instrumens de dioptrique sont composés d'une lentille appelée objectif, qui forme derrière elle une image que l'on regarde avec une autre lentille qu'on nomme oculaire. Microscope composé. — Oculaire achromatique de Campani. Lunette de Galilée. Lunette astronomique. Lunette à 4 verres.
INSTRUMENS FORMÉS DE MIROIRS ET DE LENTILLES.	Tous ces intrumens sont composés d'un grand miroir concave, qui forme en avant une image, que l'on regarde avec un oculaire ou directement ou après sa réflexion dans un miroir plan ou courbe. Télescope d'Herschell. Télescope de Newton. Télescope de Grégory. Télescope de Cassegrain. Microscope d'Amici.
DIFFÉRENS APPAREILS D'OPTIQUE.	Micromètre à double image. — Application à la mesure du grossissement dans les instrumens d'optique. Mégascope. — Lanterne magique. — Fantasmagorie. Chambre obscure. Chambre claire.

Sources de la Lumière.

LE SOLEIL, LES ÉTOILES.	Ces sources de lumière paraissent constantes. — La lumière solaire est toujours accompagnée de chaleur. Les rayons de chaleur se concentrent aux mêmes foyers que les rayons lumineux. Usage des miroirs courbes, ou d'un système de miroirs plans, ou des lentilles pour obtenir une température élevée.
CHALEUR.	Lorsque la température d'un corps dépasse 500°, il devient lumineux. Ainsi toutes les sources de chaleur deviennent des sources de lumière lorsque la température qu'elles peuvent développer dépasse cette limite, ainsi la percussion, le frottement et les actions chimiques sont des sources de chaleur. Les lumières artificielles résultent de la combustion du gaz hydrogène carboné qui provient de la décomposition de la matière combustible dans la mèche ou qui est préparé d'avance. Lampe à double courant d'air. Fanaux de M. Fresnel.
ÉLECTRICITÉ. CORPS PHOSPHORESCENS.	

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIÈRE PARTIE.

CORPS PONDÉRABLES.

Propriétés nécessaires des Corps impondérables.

Forces permanentes qui agissent sur les Corps.

Corps solides.

Corps liquides.

Corps gazeux.

IIe PARTIE.

FLUIDES IMPONDÉRABLES.

Calorique.

Électricité.

Pag.

Magnétisme.

Electricité développée par le contact.

LUMIÈRE.

FIN DE LA TABLE.



ERRATA.

Pag. 3, lig. 15, la nombre de dixièmes cherché, *lisez* le complément arithmétique du nombre de dixièmes cherché.

Pag. 7, lig. 3, étant 2 et 5, *lisez* 2 et 3.

Pag. 7, lig. 4, 4 à 25, *lisez* 4 à 9.

Pag. 8, lig. 4, : : *o'* : *o*, *lisez* : : *o* : *o'*.

Pag. 9, lig. 4, ABD, *lisez* ABDC.

Pag. 9, lig. 27, BDA, *lisez* BDA et BAD.

Pag. 10, lig. 4, A et B, *lisez* P et Q.

Pag. 10, lig. 5, C, *lisez* R.

Pag. 10, lig. 22, son intensité, *lisez* leur intensité.

Pag. 12, lig. 10, de sorte que la résultante de ces deux dernières étant égale, *lisez* de sorte que ces dernières étant égales, la résultante, etc.

Pag. 26, lig. 4, la ramenera, *lisez* le ramenera.

Pag. 36, lig. 15, le rapport, *lisez* les rapports.

Pag. 38, lig. 3, naturels, *lisez* impair.

Pag. 39, lig. 12, la faire, *lisez* le faire.

Pag. 39, lig. 28, portant, *lisez* partant.

Pag. 40, lig. 10, ces poids, *lisez* ce poids.

Pag. 45, lig. 14, évident, *lisez* évidente.

Pag. 58, lig. 37, leur vitesse, *lisez* la vitesse.

Pag. 63, lig. 29, au-dessus, *lisez* au-dessous.

Pag. 64, lig. 15, divisé, *lisez* multiplié.

Pag. 64, lig. 17, quotient, *lisez* produit.

Pag. 86, lig. 22, secondaires, *lisez* primitives.

Pag. 94, lig. 21, (82), *lisez* (*fig.* 82).

Pag. 105, lig. 26, (179), *lisez* (183).

Pag. 106, lig. 4, sin KK' = *a*, *lisez* sin KK' *a*.

Pag. 111, pénultième ligne, *supprimez* et un mouvement de rotation autour du soleil.

Pag. 116, lig. 15, *a*, lisez *m*.

Pag. 116, lig. 20, (161), *lisez* (201).

Pag. 116, lig. 25, diviser par le, *lisez* diviser le.

Pag. 116, lig. 26, celui qu'il, *lisez* par celui qu'il.

Pag. 126, lig. 12, BD, *lisez* CD.

Pag. 128, lig. 24, prismes liquides, *lisez* prismes solides.

Pag. 134, lig. 5, ont dimensions, *lisez* ont des dimensions.

Pag. 143, lig. 5, et la poussée, *lisez* 2° la poussée.

Pag. 143, lig. 6, en une seule, *ajoutez* et à un couple.

Pag. 143, lig. 13, G et M, *lisez* G et O.

Pag. 162, lig. 2, qui agit, *lisez* qui agissent.

Pag. 189, lig. 5, gaz azote — 1,96912, *lisez* — 0,96913.

Pag. 208, lig. 16, premier degré, *lisez* second degré.

Pag. 226, lig. 6, grand, *lisez* grave.

Pag. 234, lig. 14, la corde, *lisez* la verge.

Pag. 234, lig. 9, longitudinales, *lisez* transversales.

Pag. 244, lig. 15, ne rend pas exactement le même son, *lisez* n'est pas le même.

Pag. 252, lig. 18, le gas, *lisez* un gas.

Pag. 262, lig. 14, AB, *lisez* AD.

Pag. 272, lig. 36, *tb*, *lisez* t^b.

Pag. 275, dern. lig., à plusieurs, *lisez* de plusieurs.

Pag. 288, lig. 15, *supprimez* du liquide.

Pag. 295, lig. 5, 36°, *lisez* — 36°.

Pag. 296, lig. 29, le tuyau AB, *lisez* par le tuyau AB.

Pag. 297, lig. 16, fabricans de soude, *lisez* fabriques de soude.

Pag. 297, lig. 24, La correction relative à la pesée des corps dans l'air devrait être prise sur la différence de volume du corps et des poids employés. C'est par erreur qu'on a indiqué une correction correspondante relativement au poids de l'eau; il faudrait, au contraire, y ajouter le poids de l'air déplacé par les poids.

Pag. 300, lig. 5, vapeur, *lisez* vapeur d'eau.

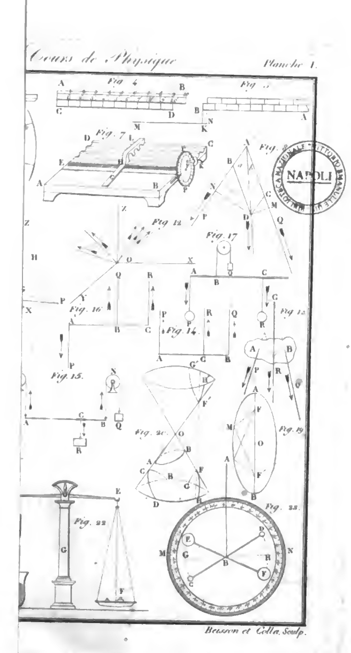
Pag. 309, lig. 7, *ajoutez* en prenant pour tension totale celle qui correspond à cette température.

Pag. 315, lig. 26, 1^{k} de glace à 75°, *lisez* 1^{k} d'eau à 75°.

P.

Pag. 323, *à la fin de la première note*, 59^m mètres cubes, *lisez* 0^m,059 mètres cubes.
Pag. 323, *à la fin de la 2e Note*, 2^k,726, *lisez* 23^k,702.
Pag. 354, lig. 6, neige, *lisez* sel.
Pag. 381, lig. 26, (*fig.* 295), *lisez* (*fig.* 293).
Pag. 387, lig. 26, par le contact, *ajoutez* de l'air.
Pag. 390, lig. 11, sa longueur, *lisez* la longueur.
Pag. 394, lig. 24, résineuse, *lisez* vitrée.
Pag. 397, lig. 34, molécules congelées, *lisez* molécules.
Pag. 400, lig. 35, de gomme, *lisez* de gomme laque.
Pag. 403, lig. 42, supérieur, *lisez* inférieur.
Pag. 408, lig. 24, parties égales, *ajoutez* ou inégales.
Pag. 415, lig. 29, AC (*fig.* 333), *lisez* AB' (*fig.* 333).
Pag. 453, lig. 30, et forment, *lisez* forment.
Pag. 455, pour l'intelligence de la Note, prolongez la ligne PM de la figure 20 et mettez N à l'extrémité.
Pag. 467, lig. 15, la réfraction se changeait, *lisez* pouvait se changer.
Pag. 474, lig. 3, en cristaux, *lisez* de cristaux.
Pag. 474, lig. 4, en cristaux, *lisez* de cristaux.
Pag. 474, lig. 5 de la Note, $\frac{1}{a^2}$, *lisez* $\frac{1}{a}$, et $\frac{1}{a}$ *lisez* $\frac{1}{a^2}$.
Pag. 476, lig. 34, mais s'il change, *lisez* il change.
Pag. 477, *pénultième ligne*, de la lumière à cette singulière modification, *lisez* à cette singulière modification de la lumière.
Pag. 489, lig. 3, la partie, *lisez* les parties.
Pag. 499, lig. 1, interférences, *lisez* ondulations.

Cours de Physique Planche 1.



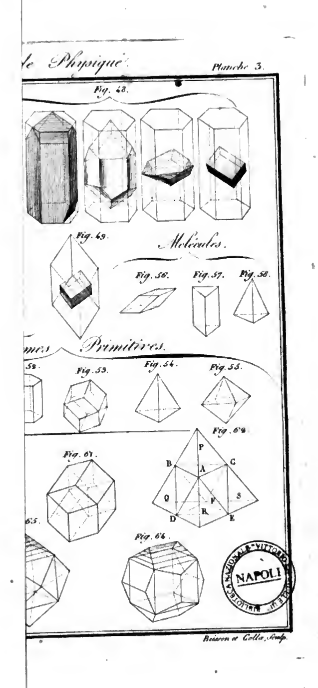
Besson et Colla, Sculp.

Cours de Physique.

Planche 2.

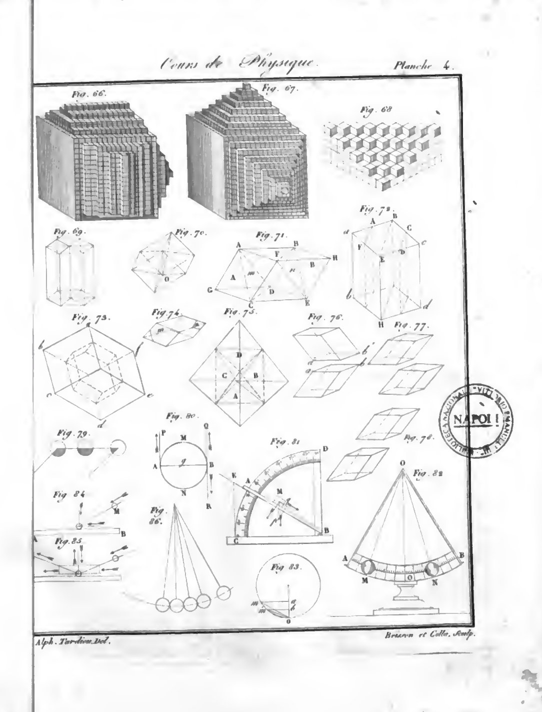
Alph. Tardieu Del.

Cella et Boisson Sculp.



...le Physique.
Planche 3.
Fig. 48.
Fig. 49.
Molécules.
Fig. 56.
Fig. 57.
Fig. 58.
...mes Primitives.
Fig. 53.
Fig. 54.
Fig. 55.
Fig. 62.
Fig. 61.
P
B
C
A
Q
F
S
D
R
E
Fig. 64.
Boisson et Colla, Sculp.

Cours de Physique. Planche 4.



Alph. Tardieu Del. Braison et Collin Sculp.

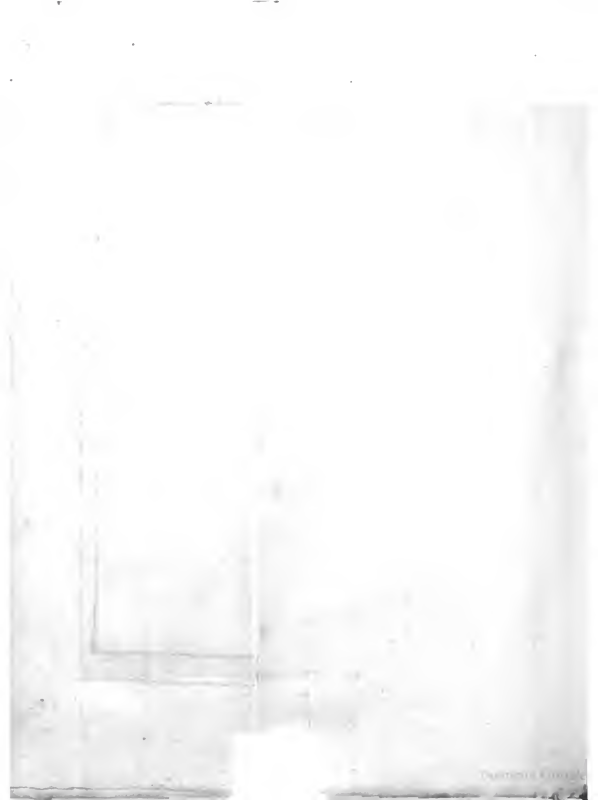
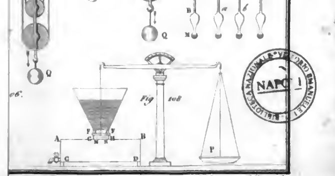


Fig. 88. Fig. 89. Fig. 90. Fig. 91. Fig. 92. Fig. 93. Fig. 95. Fig. 96. Fig. 97. Fig. 98. Fig. 99. Fig. 100. Fig. 101. Fig. 102. Fig. 103. Fig. 104.



Besson et Cella, Sculp.

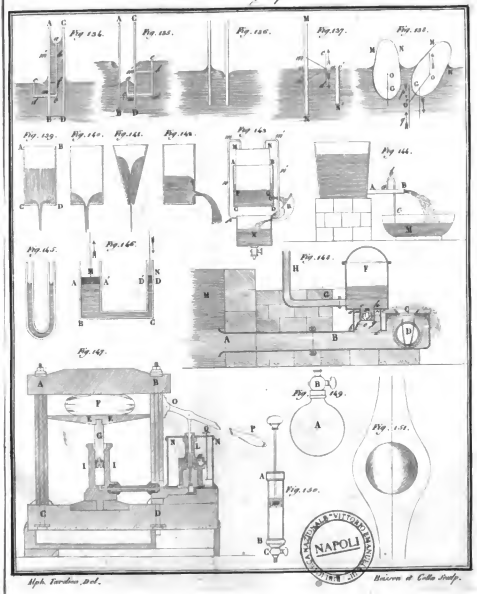


Planche 6.

Fig. 110. Fig. 111. Fig. 112. Fig. 114. Fig. 115. Fig. 116. Fig. 117. Fig. 119. Fig. 120. Fig. 121. Fig. 122. Fig. 123. Fig. 124. Fig. 125. Fig. 126. Fig. 127. Fig. 129. Fig. 130. Fig. 131. Fig. 132. Fig. 133.

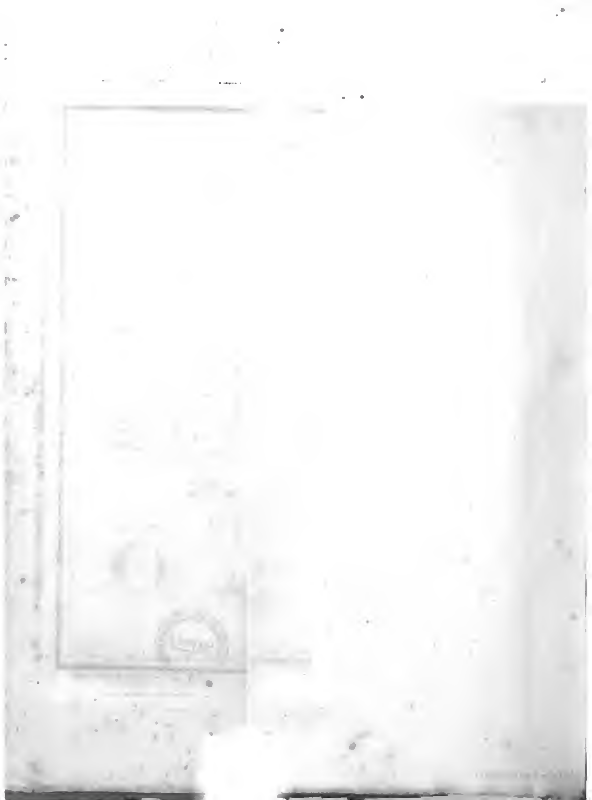
Bacon et Colla Sculp.

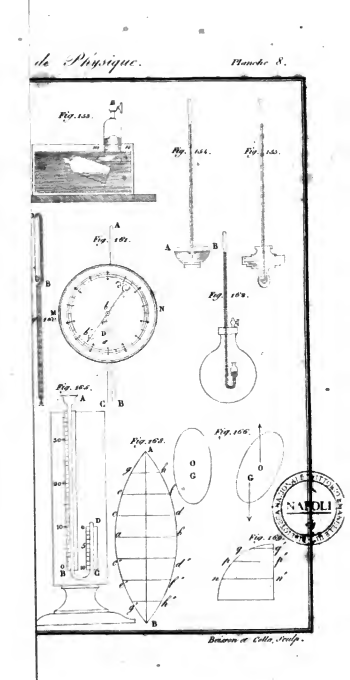

Digitized by Google



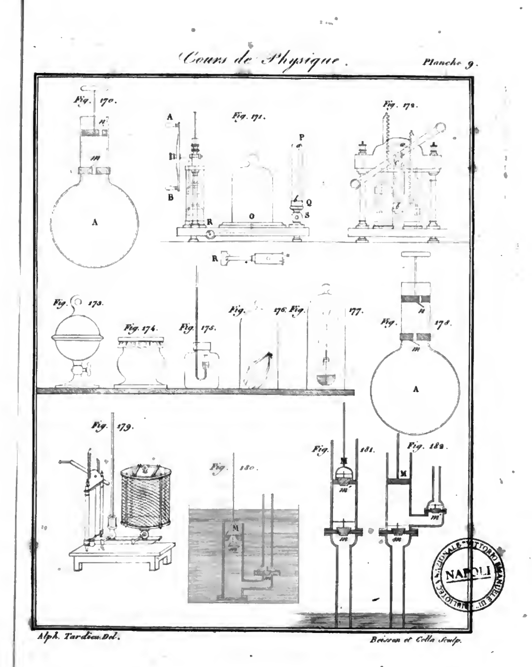
Alph. Tardieu, Del.

Boivson et Collo Sculp.





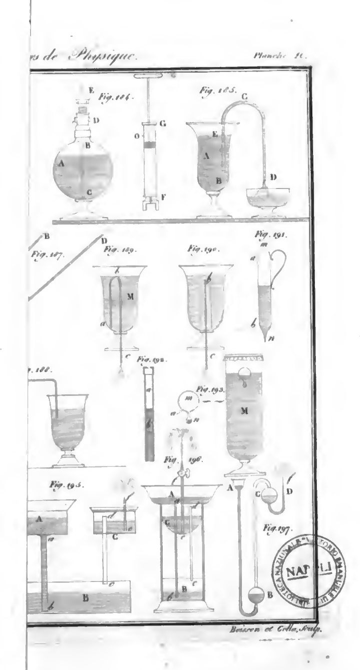
Benoron et Colla, Sculp.



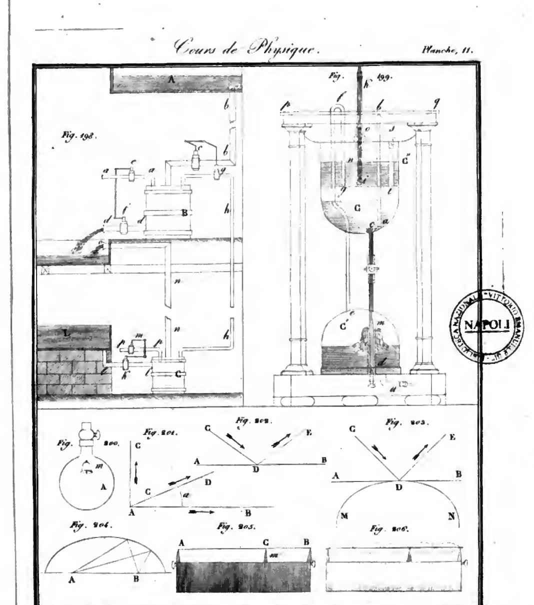
Alph. Tardieu Del.

Boisson et Colla Sculp.

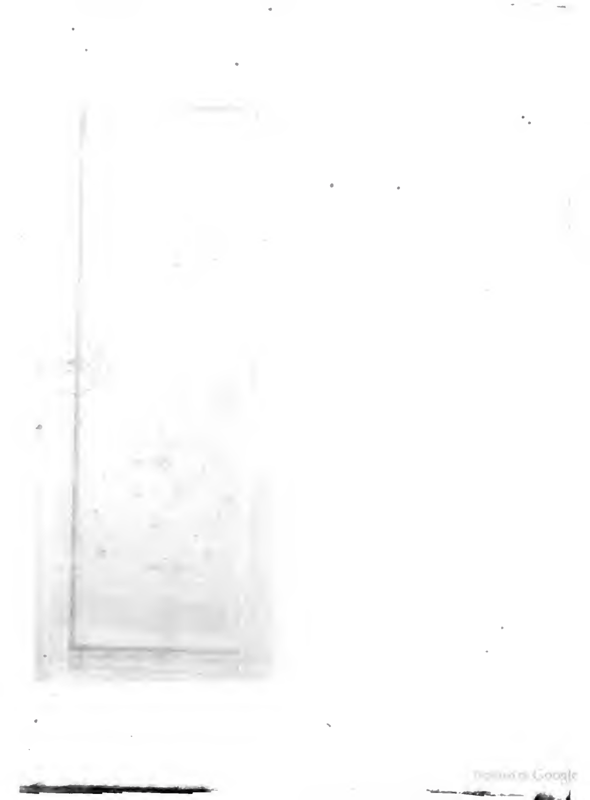


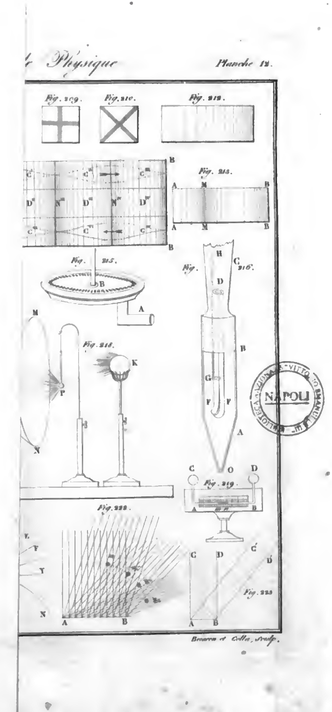


Boisson et Cella, Sculp.

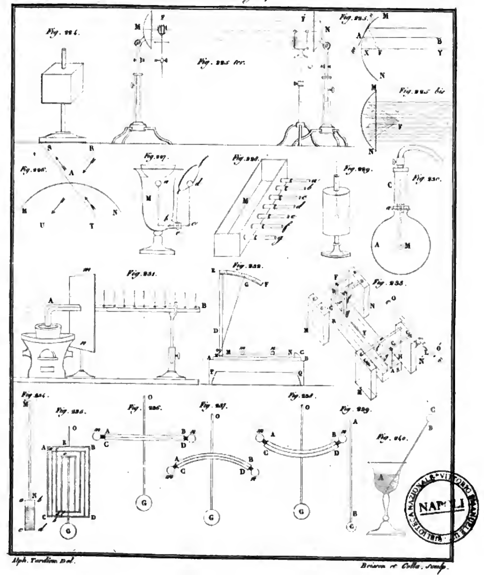


Alph. Tardieu, Del. Brisson et Colla. Sculp.

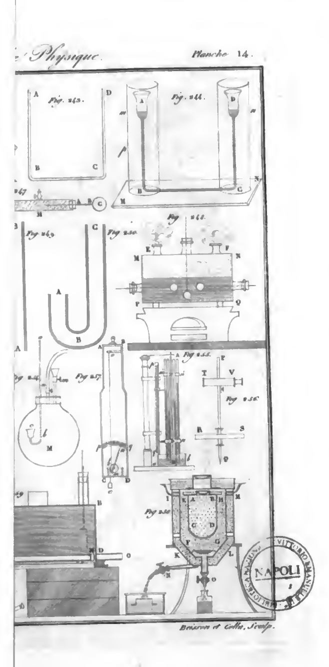




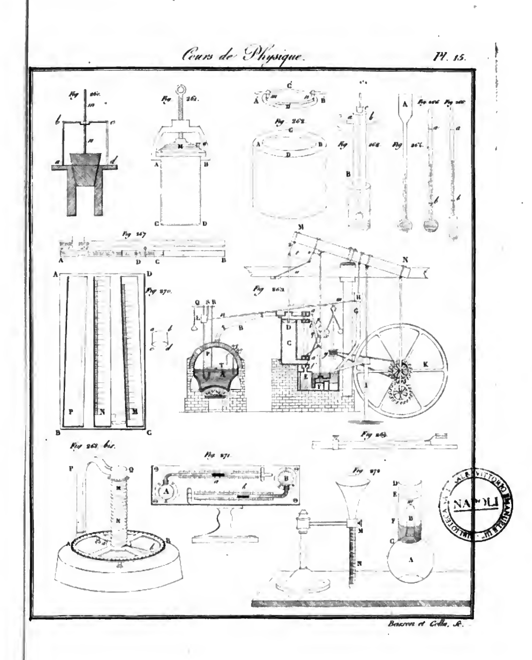
Bouvru et Colla, Sculp.

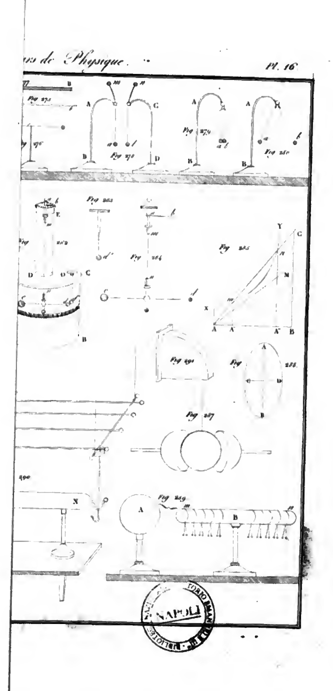


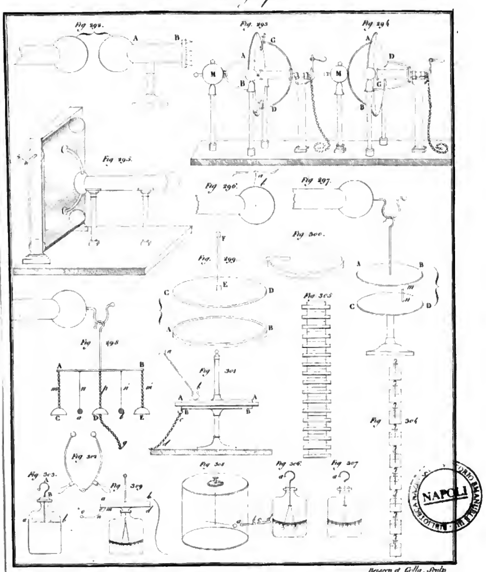
Alph. Tardieu Del. Brizon et Cella, Sculp.



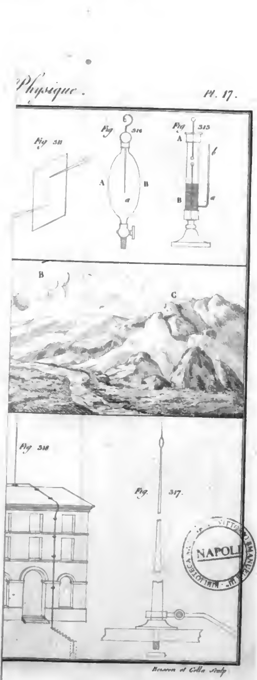
Brisson et Colla, Sculp.

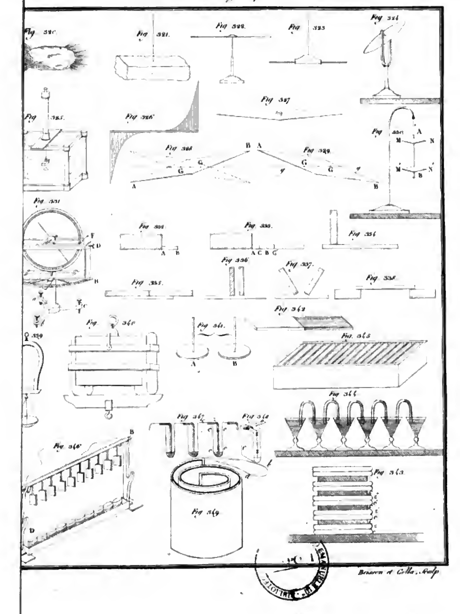

Fig 261.
Fig 262.
Fig 267
Fig 270.
Fig 263 bis.
Fig 271.
NAPOLI



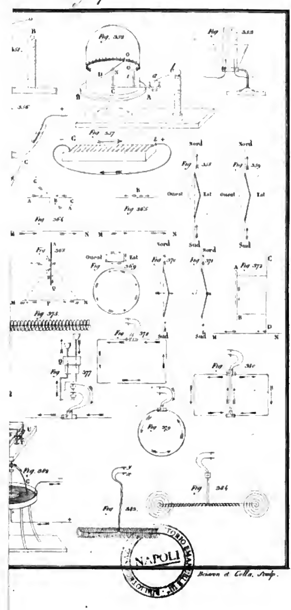


Brasen et Colla. Sculp.

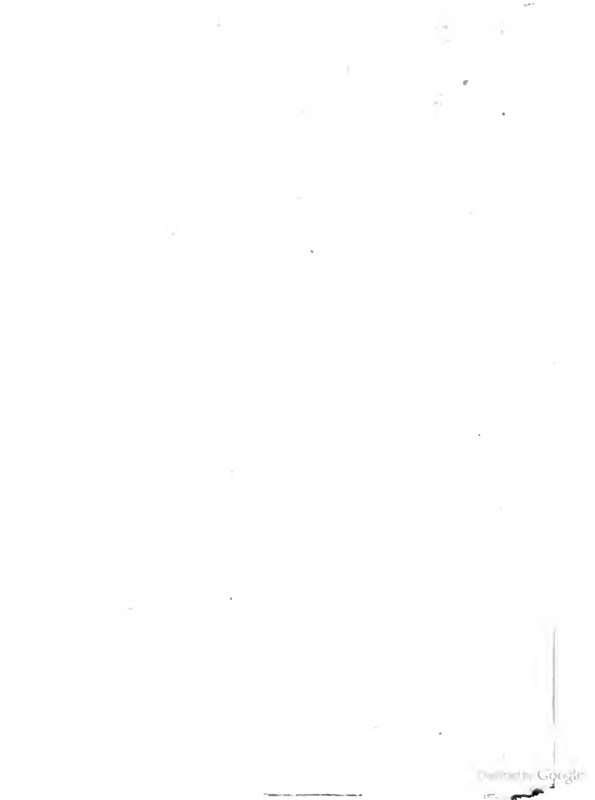

Fig 314
Fig 315
A
b
B
a
Fig 316
A
B
a
B
C
Fig 318
Fig. 317.
Brasseur et Colla sculp.

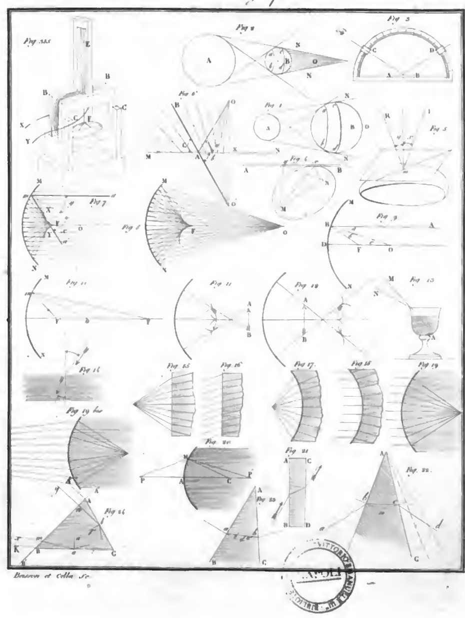


Besseron et Colla, Sculp.

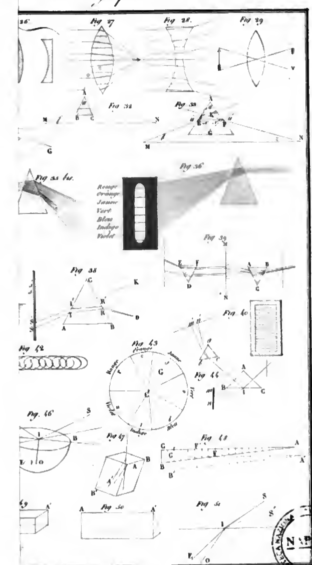


Beaurain et Colla, Sculp.





Bouvron et Cella Sc.



Besançon et Cella, Sc.

Bossoni et Colla Sc.

Fig. 71

Fig. 72

Fig. 74

Fig. 75.

Fig. 76

Fig. 78

Fig. 79

Fig. 80

Fig. 81

Fig. 82

Fig. 83

Fig. 86.

Fig. 87.

Fig. 88.

Fig. 89

Besson et Collin. Sc.

Cours de Physique.



Fig. 90 — Fig. 91 — Fig. 92 — Fig. 93 — Fig. 94 — Fig. 95 — Fig. 96 — Fig. 97 — Fig. 98 — Fig. 99 — Fig. 100 — Fig. 101 — Fig. 102 — Fig. 103 — Fig. 104 — Fig. 105 — Fig. 106 — Fig. 107 — Fig. 108 — Fig. 109 — Fig. 110 — Fig. 111 — Fig. 112

Brasson et Cella, Sc.

